

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Predikce výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů

Prediction of Energy Production from Renewable Sources

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval doc. Ing. Stanislavu Mišákovi, Ph.D. za poskytnutí odborné pomoci při zpracování této práce, jakož i cenné rady a připomínky.

Prohlášení:

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 6. května 2011

.....
Bc. Jiří Zapletal

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá predikcí výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů se zaměřením na větrné elektrárny. Úvodní část přibližuje podrobněji problematiku využití predikce výroby elektrické energie z větrných elektráren při plánování záložních zdrojů, byl popsán potenciál a instalovaný výkon větrných elektráren v České republice. Následující část se zaměřuje na jednotlivé meteorologické modely, které počítají predikovaný směr a rychlosti větru pro daný čas a predikční čtverec, sloužící následně jako vstupní data pro predikční modely. Další část s názvem „Návrh predikčního modelu“ popisuje systém korekcí, pomocí nichž je žádoucí lokalizovat získané údaje pro danou větrnou elektrárnu. V závěrečné části byla v rámci experimentálního měření na větrné elektrárně ověřována data o rychlostech větru, získaná z meteorologického předpovědního modelu a měřicího systému pro měření reálných meteorologických podmínek.

Klíčová slova

Větrné elektrárny, obnovitelné zdroje elektrické energie, energie větru, větrná mapa, instalovaný výkon větrných elektráren, predikce výroby elektrické energie, záložní zdroje, meteorologické modely, predikční modely, korekce rychlosti větru, výkonová křivka větrné elektrárny.

Abstract

This thesis deals with the prediction of energy production from renewable sources, focusing on wind power. Introductory chapter describes in detail the issue of the use of forecasts of electricity from wind power in planning backup resources, being described and the potential installed capacity of wind power plants in the Czech Republic. The second chapter focuses on different weather patterns, which calculates the predicted wind speed and direction for the time and prediction square, then used as input data for predictive models. The third chapter entitled „Proposal for a prediction model“ describes the corrections system, with which it is desirable to locate the data for the wind power plant. In the final fourth chapter in the experimental measurement of the wind power plant verified the data for wind speeds obtained from weather prediction model and measurement system for measuring real meteorological conditions.

Key words

Wind Power Plant, Renewable Electrical Energy Sources, Wind Power, Wind Map, Installed Wind Capacity, Prediction of Energy Production, Backup Resource, Meteorological Model, Prediction Model, Correction Factors, Power Curve.

Seznam použitých symbolů a zkratk

A	(m ²)	plocha
CO_2		oxid uhličitý
E_K	(J)	kinetická energie
H	(m)	výška, ve které je rychlost proudění vzduchu počítána
H_0	(m)	referenční výška
P	(W)	elektrický výkon větrné elektrárny
P_E	(kW)	výkonové ztráty dané provozem elektrárny
P_G	(kW)	elektrický výkon na výstupu z generátorů
P_{inst}	(MW)	instalovaný výkon
P_N	(W)	jmenovitý výkon
P_S	(kW)	elektrický příkon všech spotřebitelů v elektrizační soustavě
P_v	(W·m ⁻²)	energie vanoucího větru
P_Z	(kW)	ztráty výkonu v přenosové soustavě
S	(m ²)	plocha rotoru
SO_2		oxid siřičitý
SŠ		severní šířka
T	(K)	termodynamická teplota vzduchu
UTC		Coordinated Universal Time (koordinovaný světový čas)
V	(m ³)	objem
VTE		větrná elektrárna
W	(kW·h)	elektrická práce
W_E	(MW·h)	elektrická energie spotřebovaná na provoz elektrárny
W_G	(MW·h)	elektrická energie dodaná z elektráren
W_S	(MW·h)	elektrická energie odebraná spotřebiteli
W_Z	(MW·h)	elektrická energie ztracená v přenosové soustavě
ZD		západní délka
a	(–)	exponent korekčního vztahu
c_p	(–)	výkonový součinitel
d	(m)	průměr rotoru
m	(kg)	hmotnost proudícího vzduchu
p	(Pa)	atmosférický tlak
ρ	(kg·m ⁻³)	hustota vzduchu
r	(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	plynová konstanta
s	(m)	dráha
t	(h)	čas
t_0	(°C)	naměřená teplota vzduchu
v	(m·s ⁻¹)	rychlost proudění vzduchu
v_1	(m·s ⁻¹)	rychlost větru před rotorem
v_2	(m·s ⁻¹)	rychlost větru v rovině rotoru
v_0	(m·s ⁻¹)	rychlost větru v referenční výšce H_0
w	(–)	vtokový faktor

Obsah

ÚVOD.....	1
1. POTENCIÁL, INSTALOVANÝ VÝKON VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN V ČR.....	2
1.1 PŘÍNOSY VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN.....	2
1.2 PREDIKCE VÝROBY ELEKTRICKÉ ENERGIE	2
1.3 BILANCE VÝROBY A SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE	2
1.4 ZÁLOŽNÍ ZDROJE	3
1.5 ZPĚTNÉ VLIVY NA ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVU	3
1.6 PODPŮRNÉ SLUŽBY	4
1.6.1 Náklady za držení výkonové rezervy z důvodu VTE.....	6
1.6.2 Náklady za čerpání výkonové rezervy z důvodu VTE.....	7
1.7 SYSTÉMY ŘÍZENÍ VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN PRO RŮZNÉ VÝKONOVÉ HLADINY	8
1.8 VELIKOST VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY A JEJÍ VÝVOJ.....	9
1.9 INSTALOVANÝ VÝKON VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN V ČR	11
1.9.1 Větrná mapa	13
1.9.2 Předpokládaný vývoj výstavby větrných elektráren v ČR	14
1.9.3 Tabulka aktuálních instalací k 31. 12. 2010.....	15
1.9.4 Výroba elektrické energie z větrných elektráren v jednotlivých měsících v roce 2008, 2009 a 2010	17
1.10 VÝVOJ VÝKUPNÍCH CEN ENERGIE Z VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN A OSTATNÍCH OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ	18
1.11 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY VE SVĚTĚ	18
2. METODY PREDIKCE VÝROBY ELEKTRICKÉ ENERGIE Z OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ PRO VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY.....	19
2.1 METODOLOGIE PREDIKCE VÝROBY PRO VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	19
2.2 METEOROLOGICKÉ MODEL Y.....	22
2.2.1 ALADIN	23
2.2.2 HIRLAM.....	24
2.2.3 ECMWF	25
2.2.4 GFS	26
2.2.5 MEDARD	27
2.2.6 NAM	27
2.2.7 NMM-3	28
2.2.8 UMPL.....	28
2.2.9 WRF	28
3. NÁVRH PREDIKČNÍHO MODELU.....	30
3.1 KOREKCE RYCHLOSTI VZHLEDEM K VÝŠCE NÁBOJE VTE	31
3.1.1 Specifická energie větru	32
3.2 KOREKCE RYCHLOSTI A SMĚRU VĚTRU PRO DANOU VTE V DŮSLEDKU UMÍSTĚNÍ SLEDOVANÉ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY V DANÉM ČTVERCI.....	33
3.3 KOREKCE RYCHLOSTI VĚTRU VZHLEDEM KE SMĚRU VĚTRU.....	33

3.3.1	Řešení pomocí soustavy rovnic	34
3.3.2	Řešení pomocí vícedimenzionální optimalizace	35
3.3.3	Hodnocení výsledků	36
3.4	KOREKCE RYCHLOSTI VĚTRU VZHLEDEM K AKTUÁLNÍ TEPLITĚ A TLAKU	38
4.	VERIFIKACE PREDIKČNÍHO MODELU V RÁMCI EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ.....	40
4.1	OVĚŘENÍ PREDIKOVANÉ RYCHLOSTI VĚTRU Z NUMERICKÉHO MODELU POČASÍ	40
4.2	SESTAVENÍ A OVĚŘENÍ VÝKONOVÉ KŘIVKY SLEDOVANÉ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	41
4.3	OVĚŘENÍ PREDIKOVANÉHO VÝKONU	44
4.4	PŘEMĚNĚNÁ ENERGIE ZA SLEDOVANÉ OBDOBÍ	46
5.	ZÁVĚR	47
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	49
	SEZNAM TABULEK	52
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	52
	SEZNAM PŘÍLOH	54

Úvod

Přírodní silou, kterou se lidstvo dlouhodobě snaží využít ke svému prospěchu, je energie vanoucího větru. Tuto energii používá lidstvo od dávnověku, kdy vítr poháněl větrné mlýny, plachetnice či vodní čerpadla. Termínem vítr označujeme proudění vzduchu v atmosféře obklopující planetu Zemi. Za vítr je považována horizontální složka vektoru větru, vyvolávaná rozdíly v tlaku vzduchu jako důsledek nerovnoměrného ohřívání zemského povrchu a rotací Země. Rychlost větru je značně variabilní, závisí na čase a prostoru.

V současné době je proudící vzduch využíván u větrných elektráren, kde předává na listy rotoru část své kinetické energie a dále se pomocí větrné turbíny mění na rotační mechanickou energii, jež pohání generátor. Generátor následně přeměňuje mechanickou energii hřídele na energii elektrickou. Kolem rotorových listů vznikají aerodynamické síly. Pro vznik vztlaču musejí mít listy speciálně tvarovaný profil podobný jako u křídel letadel. Vztlačové síly vzrůstají s druhou mocninou rychlosti větru a se třetí mocninou rychlosti větru vzrůstá energie vyprodukovaná generátorem.

Větrná elektrárna tedy přeměňuje kinetickou energii vzduchu na elektrickou energii. V této diplomové práci však byl místo termínu přeměněná elektrická energie použit vžitý termín vyrobená elektrická energie, aby odbornému textu porozuměla i laická veřejnost.

Diplomová práce se zabývá predikcí výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů se zaměřením právě na větrné elektrárny, jejichž výkon dodávaný do distribuční sítě je značně proměnlivý v závislosti na okamžitých klimatických podmínkách v daném místě. Platí zde naprosto jiná pravidla, než například pro zdroj elektrické energie, který zpravidla dodává do distribuční sítě výkon shodný s instalovaným výkonem daného zdroje (např. jaderná elektrárna).

Změny velikosti dodávaného výkonu z větrných elektráren do distribuční sítě je potřeba eliminovat pomocí záloh, které jsou po různou dobu schopny korigovat výkyvy v síti. Záložní zdroje pak pokrývají výpadky způsobené bezvětrím. Problémem je však určit správnou velikost rezerv a tím snížit ekonomickou náročnost. Ke správnému odhadu napomáhá právě predikce výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Operátoři mají možnost se dopředu připravit na očekávanou dodávku elektrické energie z větrných elektráren.

Diplomová práce je rozdělaná do čtyř kapitol. Teoretická část první a druhé kapitoly pojednává nejprve o významu predikce elektrické energie z obnovitelných zdrojů, s tím souvisejí podpůrné služby zajišťující kvalitu a spolehlivost přenosu elektrické energie. Dále je uveden aktuální stav instalovaného výkonu pro rok 2010, umístění větrných elektráren, předpokládaný vývoj výstavby v letech následujících a přínosy větrné energetiky ve formě vyrobené elektrické energie z těchto zdrojů za poslední měsíce a roky.

Matematickými metodami použitých při predikci výroby elektrické energie a popisem meteorologických modelů se zabývá druhá kapitola.

Obsahem třetí kapitoly je návrh predikčního modelu pomocí systému korekcí, z nichž každá korekce má jiný vliv na výslednou přesnost předpovědi rychlosti a směru větru.

Čtvrtá kapitola se zabývá porovnáním dat získaných v rámci experimentálního měření na větrné elektrárně s daty získanými z meteorologického modelu pro předpověď rychlosti a směru větru.

1. Potenciál, instalovaný výkon větrných elektráren v ČR

1.1 Přínosy větrných elektráren

Větrné elektrárny řadíme mezi čistě obnovitelné zdroje energie, jejichž majoritní výhoda spočívá v nulové produkci CO₂ (žádný spalovací proces), zdraví obyvatelstva tak neohrožují exhaláty vlivem absolutní absence SO₂, popílku a prachu. Jediná větrná elektrárna jmenovitého výkonu 2 MW průměrně vyrobí 4 430 MW·h elektřiny za rok. To je pro představu asi roční spotřeba 1 265 domácností (3 200 osob). V roce 2008 bylo vyrobeno pomocí větrných elektráren 244,6 GW·h, to je asi roční spotřeba 69 700 domácností (174 300 osob). Stejného množství elektrické energie by se dosáhlo například spálením 244 000 tun uhlí, které by vyprodukovalo 245 000 tun CO₂. Návratnost počáteční energie potřebné při výrobě a instalaci větrné elektrárny se pohybuje v rozmezí 3 až 6 měsíců. [31]

Větrné elektrárny přispívají k nižší energetické závislosti na zahraničních zdrojích. Disponují minimálními nároky na zábor zemědělského půdního fondu v přepočtu na MW instalovaného výkonu a nové typy těchto elektráren dokážou lépe využít potenciálu lokality. Díky jednoduché montáži a následné demontáži po ukončení životnosti je tato využitá lokalita prakticky nezměněna. Při demontáži je cena získaných surovin vyšší než náklady na likvidaci. Větrné elektrárny v České republice patří mezi obnovitelné zdroje elektrické energie s nejnižší výkupní cenou, blíží se nejvíce k ceně elektřiny silové. Velká část dílů se vyrábí českými firmami a investované finance do větrné energetiky tak z větší části podporují domácí ekonomiku. Provozovatel větrné elektrárny finančně podporuje obci, v jejímž katastrálním území je umístěna větrná elektrárna, po celou dobu její životnosti. [31]

1.2 Predikce výroby elektrické energie

V rámci platné energetické legislativy v České republice došlo v roce 2010 k obrovskému nárůstu žádostí o připojení větrných i fotovoltaických elektráren do distribučních sítí. Situace nastala reakcí na nepoměr k nízkým výkupním cenám elektrické energie u nás a v okolních státech. Tento značný nárůst instalovaného výkonu z větrných a fotovoltaických elektráren negativně ovlivňuje provoz elektrizační soustavy jak v České republice, ale i tak v ostatních zemích Evropské unie. Protože se jedná o obnovitelné zdroje s velkou variabilitou dodávaného výkonu, je provoz elektrizační soustavy v hlavní míře ovlivňován nestabilitou dodávaného výkonu do distribuční sítě z těchto zdrojů. Výkon dodávaný větrnou či fotovoltaickou elektrárnou se dynamicky mění v závislosti na změnách rychlosti a směru větru u větrných elektráren a intenzity slunečního záření u fotovoltaických elektráren. Změny velikosti dodávaného výkonu je potřeba eliminovat pomocí záloh a pro jejich naplánování se využívá predikce výroby elektrické energie. [1]

1.3 Bilance výroby a spotřeby elektrické energie

Většina elektráren pracuje paralelně do elektrizační soustavy, která je složena ze tří hlavních částí:

- a) Výrobní část,
- b) přenosová část,
- c) spotřební část.

Přitom výroba a její přenos závisí na spotřebě elektrické energie a to, jak co do množství, tak i časového rozložení výkonu. V zásadě platí bilance výroby a spotřeby elektrické energie:

$$W_G - W_E - W_Z = W_S \quad (\text{MW}\cdot\text{h}) \quad (1.1)$$

kde: W_G je elektrická energie dodaná z elektráren (MW·h)
 W_E je elektrická energie spotřebovaná na provoz elektrárny (MW·h)
 W_Z je elektrická energie ztracená v přenosové soustavě (MW·h)
 W_S je elektrická energie odebraná spotřebiteli (MW·h) [2]

Analogicky pro každý časový okamžik platí výkonová rovnice:

$$P_G - P_E - P_Z = P_S \quad (\text{kW}) \quad (1.2)$$

kde: P_G je elektrický výkon na výstupu z generátorů (kW)
 P_E jsou výkonové ztráty dané provozem elektrárny (kW)
 P_Z jsou ztráty výkonu v přenosové soustavě (kW)
 P_S je elektrický příkon všech spotřebitelů v elektrizační soustavě (kW) [2]

1.4 Záložní zdroje

Je nutné mít vybudovanou dostatečnou soustavu záložních zdrojů, kvůli nepravidelnosti v dodávkách elektrické energie z větrných elektráren. Záložní zdroje pokrývají výpadky způsobené bezvětrím. Tyto energetické zálohy nejsou poskytovány obnovitelnými zdroji. Většinou jsou založeny na spalování uhlí a plynu. Jedná se tedy o elektrárny, které mají možnost podle potřeby v krátkém intervalu, počítaném na minuty, najet na plné jmenovité zatížení. Mezi takové elektrárny patří například vodní akumulární elektrárny s přirozenou či umělou akumulací, elektrárny se spalovacími turbínami a v některých případech i parní elektrárny, kde jsou zvláštní turbíny přizpůsobené k rychlému najíždění a odstavování. V České republice jsou zálohy pro udržení stabilního spolehlivého a bezpečného chodu elektrizační soustavy drženy v hlavní míře v elektrárnách, které jsou schopny velmi rychlé změny dodávaného výkonu, jako v uhelných a paroplynových elektrárnách. Vlastním problémem však zůstává správný výpočet velikosti rezerv a tím snížení ekonomické náročnosti. Tento výpočet je odvozen od plánování dodávek výkonu ze všech zdrojů připojených do elektrizační soustavy, jako i větrné a fotovoltaické elektrárny. Protože dodávka elektrické energie z těchto zdrojů je poněkud nestabilní, je pro plánování velikosti rezerv důležitý správný odhad, v čemž pomáhá právě predikce výroby elektrické energie z těchto obnovitelných zdrojů. Přesnost predikce se neustále zlepšuje a umožňuje tak uvolnit zdroje, které by jinak zůstaly blokovány jako rezervní výkon. Operátoři mají možnost se dopředu připravit na očekávanou dodávku z VTE i když nastávají případy s časově posunutou nebo nepřesnou predikcí. [1], [2], [3]

1.5 Zpětné vlivy na elektrizační soustavu

Větrné elektrárny se řadí mezi ekologické a perspektivní zdroje elektrické energie, avšak jejich rozvoj je doprovázen i množstvím problémů. Snaha, ať už investorů či provozovatelů elektrizační soustavy, by se měla zaměřit k nalezení rovnováhy mezi požadavky obou stran. Výrobci preferují především co největší objem výroby v megawatthodinách, spolehlivost či životnost výrobní. Tomu odpovídá i co nejkratší doba návratnosti investice, tedy za jak dlouho příjmy z investice pokryjí výdaje, vynaložené na investici, kalkulováno v letech. Oproti tomu snahou provozovatele elektrizační

soustavy je co největší kvalita elektrické energie a maximální snížení negativních zpětných vlivů na celou elektrizační soustavu. Vždyť rozvoj větrné energetiky je závislý na možnostech vstupu vyrobené energie do distribuční sítě. [6]

Mezi zpětné vlivy na elektrizační soustavu se řadí:

- Časový interval dodávky elektrické energie z větrné elektrárny,
- kolísání toku výkonu dodávaného do elektrizační soustavy,
- vliv větrné elektrárny na kvalitu elektrické energie, především pak na kvalitě napětí,
- přechodné děje související se spínacími operacemi systémů větrných elektráren. [6]

1.6 Podpůrné služby

Podpůrné služby slouží k poskytování systémových služeb přenosové soustavy v České republice, tedy zajišťují kvalitu a spolehlivost přenosu elektrické energie. Kategorie podpůrných služeb:

- Primární regulace frekvence,
- sekundární regulace výkonu bloku,
- terciární regulace výkonu bloku,
- rychle statující 10-ti minutová záloha,
- rychle startující 15-ti minutová záloha,
- dispečerská záloha,
- výpomoc ze synchronně pracující soustavy,
- operativní krátkodobá regulace zatížení,
- sekundární regulace jalového výkonu bloku,
- poskytování záložního jalového výkonu,
- schopnost ostrovního provozu,
- schopnost startu ze tmy,
- poskytnutí napětí ze zahraniční soustavy. [3]

Tyto jednotlivé zálohy potřebují různou dobu pro uvedení do chodu (např. najet na svůj jmenovitý nebo předem sjednaný výkon) a po různou dobu jsou schopny korigovat výkyvy v síti. Od sebe se též odlišují způsobem, jakým ovlivňují elektroenergetickou soustavu (korigují frekvenci střídavého napětí, činný výkon, jalový výkon, atd.). [3]

Nouzové zálohy „Schopnost ostrovního provozu“ a „Schopnost startu ze tmy“ jsou vyhrazené pro obnovení soustavy, pokud dojde k jejímu částečnému nebo úplnému zhroucení. S tím jsou spojené i obzvlášť vysoké technické požadavky, kladené na tyto dva typy záloh. Elektrárenské bloky zapojené do těchto regulací musí být po určitou dobu samostatně způsobilé korigovat výkyvy ve spotřebě či výrobě v části energetické sítě. [3]

Záloha „Poskytnutí napětí ze zahraničí soustavy“ je použita v situacích, kdy už tuzemská produkce není schopna pokrýt krátkodobý výkyv ve spotřebě nebo výrobě a přitom v některé zahraniční synchronně pracující soustavě jsou k dispozici zálohy, schopné tento výkyv pokrýt. Vzájemné poskytování záloh, zejména mezi sousedními státy, patří k podstatnému prvku pro zvýšení stability sítě. [3]

Pro jednotlivé typy záloh je vypočtena hodnota rezervního výkonu, jež musí být stále připraven k použití. Na pokyn operátora je celý výkon či předem sjednaná část dodáván do rozvodné sítě (tzv. čerpání zálohy). Tento výkon je označován za rezervní. Velikost rezervního výkonu se řídí charakteristikami elektroenergetické sítě (jako množství a kapacita energetických bloků v soustavě, velikost zatížení soustavy, kolísání výroby či spotřeby atd.) a je závislá na tom, jak se v průběhu roku mění obvyklé zatížení v daném období. Rezervní výkony se kupují u výrobců elektrické energie na základě dohody. Převážná většina se nakupuje na základě dlouhodobých kontraktů a zhruba desetina je nakupována prostřednictvím denního trhu. Cena energie ze záložních zdrojů často převyšuje cenu energie dodávané v rozsahu standardní výroby. [3]

Za větrné elektrárny se při nepříznivých povětrnostních podmínkách využívají, vzhledem ke svým vlastnostem, následující typy záloh:

- Sekundární regulace výkonu,
- terciární regulace výkonu,
- dispečerská záloha. [3]

Sekundární regulace výkonu je proces, při kterém bloky zapojené do této regulace dodávají elektrickou energii o předem daném výkonu. Na pokyn dispečera musí být schopny změny velikosti výkonu v určitém intervalu symetricky, směrem nahoru i dolů. Minimální rychlost rozdílu výkonu bloku je $2 \text{ MW} \cdot \text{min}^{-1}$. Pro tuto regulaci se v rámci výkonu bloku vyčlenění výkon (tzv. sekundární regulační záloha). Velikost této sekundární regulační zálohy závisí na technologických vlastnostech bloku. Regulace musí být realizována nejpozději do 10 minut od pokynu dispečera. [3]

Terciární regulace výkonu napomáhá k zajištění nezbytné sekundární regulační zálohy. Terciární regulace výkonu spočívá ve změně výkonu bloku na základě požadavku dispečera. Změna výkonu musí mít spojitý (kontinuální) charakter. Terciární regulace může být kladná (zvýšení dodávaného výkonu do sítě) nebo záporná (snížení dodávaného výkonu do sítě). Při terciární regulaci by měla být celá velikost regulační zálohy realizovaná nejpozději do 30 minut od požadavku. Minimální rychlost změny výkonu je $2 \text{ MW} \cdot \text{min}^{-1}$. Maximální velikost poskytované terciární regulace na jednom bloku nesmí překročit hodnotu 100 MW. [3]

Dispečerskou zálohu tvoří bloky elektráren odstavené do zálohy, schopné na žádost dispečera najet na jmenovitý nebo předem určený výkon do dohodnutých minut (volí se 30, 60, 90 či 360 minut). Poskytovatel musí odstavit blok do zálohy za 30 minut. Mezi úkoly dispečerské zálohy patří dokrytí zatížení sítě v případě velkých chyb při jeho předpovědi. Minimální výkon bloku pro dispečerskou zálohu musí být přinejmenším 15 MW. [3]

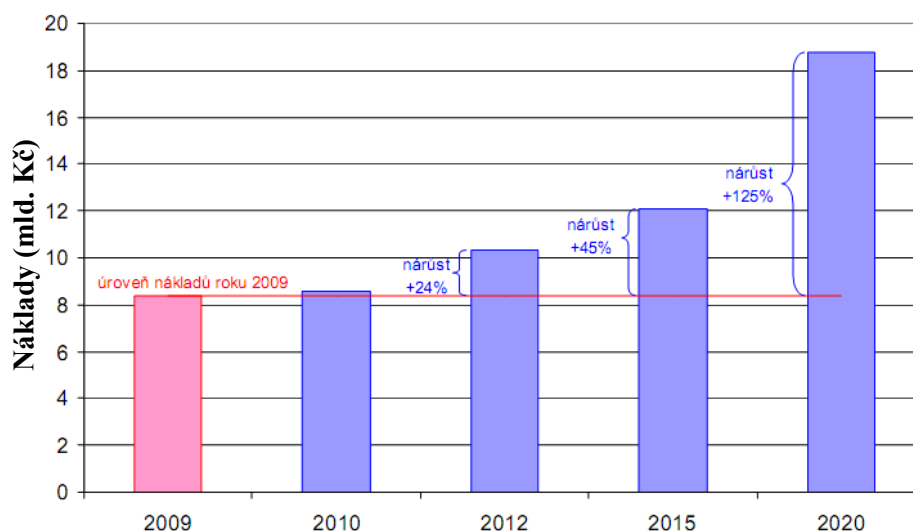
Postupně se zvyšují požadavky na jednotlivé typy záloh, které ovlivňují všechny faktory v soustavě, jako např. průběh diagramu zatížení, měnící se struktura výrobních zdrojů (přechází se od menších instalovaných výkonů bloku k větším jednotkovým výkonům), a vzrůstají požadavky na spolehlivost v následujících letech. [3]

Tab. 1.1 Regulované ceny za držení záloh [3]

Typ zálohy	Cena (Kč/MW·h ⁻¹)
Sekundární	920
Terciární	650
Dispečerská	370

Tab. 1.2 Regulované ceny za čerpání záloh [3]

Typ zálohy	Cena (Kč/MW·h)
Sekundární	2000
Terciární	2300
Dispečerská	4000



Obr. 1.1 Vývoj nákladů na nákup podpůrných služeb při uvažovaném rozvoji VTE z roku 2009 [14]

Vývoj nákladů podpůrných služeb závisí na faktorech, jako je množství připojených obnovitelných zdrojů, vývoj cen silové elektřiny či na vývoji spotřeby elektřiny. Pro rok 2010 byla regulována cena systémových služeb ve výši 155,40 Kč za MW·h. Na obr. 1.1 jsou uvedeny skutečné náklady za rok 2009 na nákup podpůrných služeb a očekávané skutečnosti v následujících letech. V roce 2012 dochází dle scénáře k nárůstu nákladů na podpůrné služby o 24 % oproti roku 2009, tomu by odpovídala regulovaná cena systémových služeb na úrovni 192 Kč za MW·h. [14]

1.6.1 Náklady za držení výkonové rezervy z důvodu VTE

Společnost zajišťující provoz přenosové soustavy plánuje navýšení záloh kvůli větrným elektrárnám o 25 % jejich instalovaného výkonu. Podíl vychází z předběžného modelu a k možnému zpřesnění dojde až na základě praktických zkušeností s provozem větrných elektráren. Instalovaný výkon v tab. 1.3 pro rok 2009 a 2010 je aktuální instalovaný výkon za tyto roky a údaje za rok 2011 a 2012 vychází z obr. 1.8 pro předpokládaný vývoj instalovaného výkonu. [14]

Tab. 1.3 Navýšení držení výkonové rezervy z důvodu VTE [14]

Rok	Celkový instalovaný výkon VTE (MW)	Sekundární záloha (MW)	Terciární záloha (MW)	Dispečerská záloha (MW)	Celkové navýšení záloh (MW)
2009	193	10	20	20	50
2010	215	15	20	20	55
2011	547	40	50	50	140
2012	798	60	70	70	200

Tab. 1.4 zobrazuje roční náklady za držení výkonové rezervy z důvodu větrných elektráren připojených do elektrizační soustavy. Jedná se o pouhé držení zálohy, kdy teoreticky záložní zdroje nemusí vyrobit ani jednu kilowatthodinu a přesto zákazníci zaplatí na poplatcích poskytovatelům podpůrných služeb uvedenou částku. [14]

Tab. 1.4 Navýšení nákladů za držení výkonové rezervy z důvodu VTE [14]

Rok	Celkový instalovaný výkon VTE (MW)	Náklady na sekundární zálohu (mil. Kč/rok)	Náklady na terciární zálohu (mil. Kč/rok)	Náklady na dispečerskou zálohu (mil. Kč/rok)	Celkové navýšení nákladů (mil. Kč/rok)
2009	193	81	114	65	259
2010	215	121	114	65	300
2011	547	322	285	162	769
2012	798	484	399	227	1 109

1.6.2 Náklady za čerpání výkonové rezervy z důvodu VTE

Záložní zdroje budou dodávat průměrně 4,6 % instalovaného výkonu větrných elektráren tak, aby výroba energie z větrných elektráren neklesla pod 25 % jejich instalovaného výkonu, který mají záložní zdroje ještě pokrýt. Samotné náklady na čerpání (nikoli držení) jednotlivých záloh jsou vyčísleny v tab. 1.6. [14]

Tab. 1.5 Roční navýšení čerpání energie dodávané ze záloh z důvodu VTE

Rok	Celkový instalovaný výkon VTE (MW)	Sekundární záloha (MW·h)	Terciární záloha (MW·h)	Dispečerská záloha (MW·h)	Celkové čerpání záloh (MW·h)
2009	193	23 321	27 272	27 201	77 793
2010	215	25 979	30 380	30 302	86 661
2011	547	66 096	77 293	77 093	220 482
2012	798	96 425	112 761	112 468	321 654

Tab. 1.6 Náklady na čerpání jednotlivých záloh z důvodu VTE

Rok	Celkový instalovaný výkon VTE (MW)	Náklady na čerpání sekundární zálohy (mil. Kč/rok)	Náklady na čerpání terciární zálohy (mil. Kč/rok)	Náklady na čerpání dispečerské zálohy (mil. Kč/rok)	Celkové náklady na čerpání záloh (mil. Kč/rok)
2009	193	47	63	108	218
2010	215	52	70	121	243
2011	547	132	178	308	618
2012	798	193	259	450	902

Všechny výše vypočtené údaje jsou pro plánované navýšení záloh kvůli větrným elektrárnám o 25 % jejich instalovaného výkonu.

1.7 Systémy řízení větrných elektráren pro různé výkonové hladiny

Většina větrných elektráren v České republice je vybavena asynchronními generátory, které slouží jako zdroje elektrické energie. U větrných elektráren malých a středních výkonů (asi do 300 kW) jsou nejčastěji používány asynchronní generátory s kotvou nakrátko. Pro připojení k distribuční soustavě se používají asynchronní generátory s přepínáním počtu pólů nebo přes tyristorový spouštěč (tzv. softstartér). Mezi hlavní výhody těchto systémů patří jejich poměrně jednoduchá konstrukce a malá náročnost na údržbu. Jelikož dodávka činného výkonu je podmíněna nadsynchronními otáčkami asynchronního generátoru, je naopak mezi nevýhody řazena malá účinnost systému při menších rychlostech větru. Dalším handicapem jsou nežádoucí přechodné děje, které souvisejí se spínáním asynchronního generátoru k distribuční soustavě, popř. s připojením kompenzačního zařízení, a nedostatečná kompenzace jalového výkonu, která se většinou řeší jako stupňovitě spínaná. [6]

U větrných elektráren velkých výkonů (850 kW, 2 MW) jsou v současnosti nejvíce používány systémy v tzv. kaskádním zapojení, hovoříme o systémech řízení s asynchronními generátory s vinutým (kroužkovým) rotorem, jež pracují souběžně s měničem frekvence s rekuperační jednotkou. K zajištění stabilnější dodávky elektrické energie do distribuční soustavy se používá řídicí systém větrné elektrárny s měničem frekvence. Pomocí něj dosáhneme i lepšího využití energie větrného proudění. [6]

Je-li v chodu systém v kaskádním zapojení, do elektrizační soustavy je přímo připojen stator generátoru (přes transformátor nn/vn) a vinutý rotor generátoru se napájí z měniče frekvence. Správná činnost tohoto zařízení je zabezpečena víceprocesorově. Systém řízení následně vyhodnocuje momentovou charakteristiku stroje, která se přizpůsobuje otáčkám větrného motoru a rychlosti větru. Pro zabezpečení maximálního využití větrné energie je průběh napětí a proudu na rotoru generátoru řízen, se snahou minimalizovat negativní vlivy na distribuční soustavu. Takový výkon, řízený měničem frekvence, je vzhledem k výkonu generátoru minimální, čímž jeho vliv na distribuční síť je nepatrný. K dalšímu úkolu řídicího systému patří zabezpečení připojování do sítě bez výrazných přepětových dějů a s minimálním proudovým rázem v generátorickém chodu. [6]

Větrné elektrárny se používají pro různé napěťové a výkonové hladiny. Systémy řízení je v podstatě možné rozdělit následovně:

- Systémy s paralelní spoluprací s elektrizační soustavou,
- ostrovní systémy,
- hybridní ostrovní systémy. [7]

Systém s paralelní spoluprací s elektrizační soustavou je určený pro elektrárny vyšších výkonů. Tyto systémy připojené na síť jsou obvykle zřizovány na rodinných domech, průmyslových objektech nebo farmách. Energie přeměněná systémem se spotřebuje přímo v daném objektu, možné přebytky jsou prodány do distribuční sítě nebo je systém určen výhradně k dodávkám energie do distribuční sítě bez žádné vlastní spotřeby v místě instalace za výkupní ceny. [7]

Ostrovní systémy se používají tam, kde není možnost využívat elektrickou energii dodávanou z distribuční sítě. Zpravidla se tak děje na odlehlých místech, chatách, zahradních domcích, chalupách, obytných přívěsech, v odlehlých průmyslových objektech atd. Na takových místech obvykle požadujeme komfort, kterým v určitém slova smyslu elektrická energie je. Vybudovat elektrickou přípojku nemusí být možné vždy, protože výdaje na zřízení přípojky mohou být neúnosné a nemusí odpovídat případnému užitku zřízené přípojky. [7]

Hybridní ostrovní systémy jsou tvořeny kombinací několika zdrojů elektrické energie. Hybridní ostrovní systém je rozšířen o doplňkové zdroje elektrické energie, které pokryjí spotřebu v obdobích, kdy dodávaný výkon z jednoho zdroje elektrické energie je nedostatečný. Hybridní ostrovní systém může být tvořen kombinací těchto zařízení - větrná elektrárna, elektrocentrála, kogenerační jednotka, fotovoltaický systém apod. [7]

1.8 Velikost větrné elektrárny a její vývoj

S vývojem technologií se rozvíjejí i větrné elektrárny, mění se jak jejich velikosti, tak i výkonové parametry.

Výkon větrné elektrárny lze vypočítat dle vzorce:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot c_p \cdot S \quad (\text{W}) \quad (1.3)$$

kde: P je výkon větrné elektrárny (W)
 ρ je hustota vzduchu ($1,225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
 v je rychlost proudění vzduchu ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
 c_p je výkonový součinitel (–)
 S je plocha rotoru (m^2) [4]

Po dalších úpravách tohoto vzorce lze dojít k závěru, že výkon větrné elektrárny je závislý na druhé mocnině průměru rotoru.

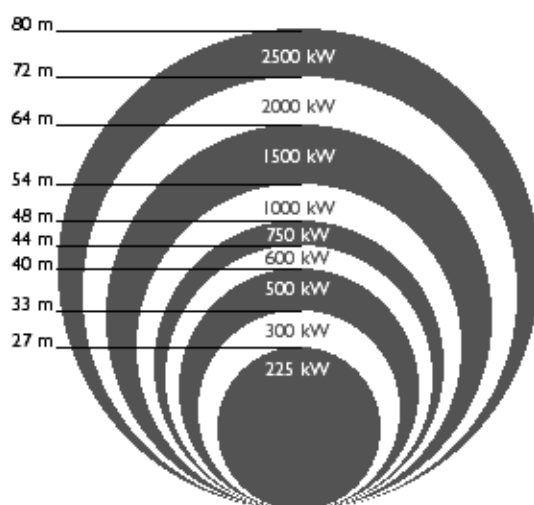
Výkonový součinitel (účinnost stroje) c_p udává, jaká část energie větru je přeměněna v mechanickou energii, maximální možná účinnost větrného stroje je 59,3 %. [4]

$$c_p = 4 \cdot w \cdot (1 - w^2) \quad (–) \quad (1.4)$$

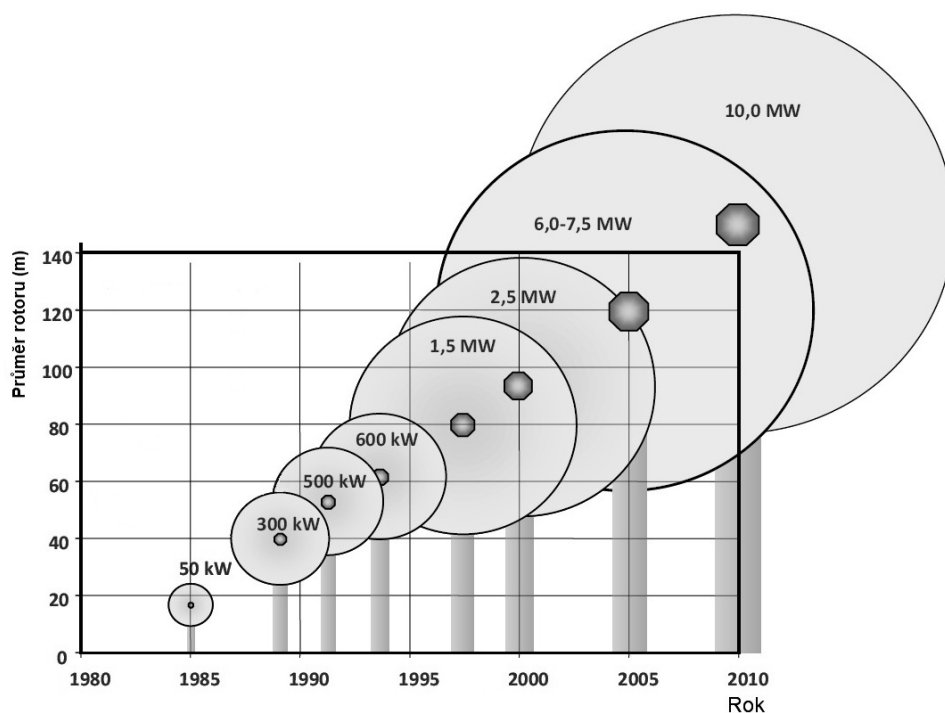
$$w = \frac{v_1 - v_2}{v_1} \quad (–) \quad (1.5)$$

kde: w je vtokový faktor (–)
 v_1 je rychlost větru před rotorem ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
 v_2 je rychlost větru v rovině rotoru ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) [4]

Na obr. 1.2 je k jmenovitému výkonu větrné elektrárny přidružena průměrná velikost rotoru. Neboť různé typy větrných elektráren mají podle výrobce rozdílnou účinnost, je uvedena na obr. 1.2 průměrná hodnota velikosti rotoru. Ze stejného průměru rotoru jsme schopni získat různě vysoké výkony. [4]



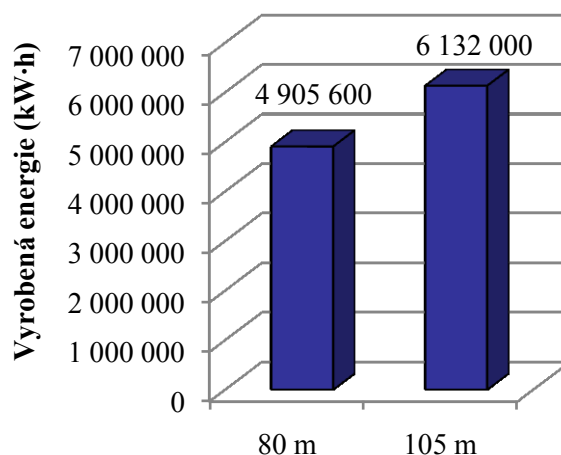
Obr. 1.2 Závislost průměru rotoru na jmenovitém výkonu VTE [4]



Obr. 1.3 Vývoj velikosti a instalovaného výkonu VTE v čase [4]

Nový směr vývoje větrných elektráren míří dle předchozích obrázků k vyšším stožárům a větším průměrům rotorů. Při nalezení vhodné lokality na výstavbu větrné elektrárny usilujeme o to, abychom vytěžili maximum energie. K tomu lze dospět použitím menšího počtu větrných elektráren s vyššími stožáry, které vyzvednou celou gondolu do oblasti výrazně vyšších rychlostí proudění vzduchu. Větší průměr rotoru pak sbírá energii větru z podstatně větší plochy. Zvětšení plochy rotoru

o stovky až tisíce čtverečných metrů se dosáhne zvětšením průměru rotoru v řádu metrů, samozřejmě v závislosti na počátečním průměru rotoru. Výkon elektrárny se zvýší s touto navýšenou plochou rotoru, která poskytuje větší energii proudícího vzduchu. Se zvyšováním průměru rotoru roste výkon elektrárny s druhou mocninou, naproti tomu lineárně klesají otáčky. [4]



Obr. 1.4 Vyrobená energie za rok v závislosti na výšce stožáru VTE [4]

Na obr. 1.4 se porovnává roční produkce elektrické energie ze dvou větrných elektráren stejného typu a výrobce, osazené generátorem o výkonu 2 MW, rotorový průměr činí 90 m. Obě větrné elektrárny jsou postaveny v lokalitě s téměř shodnými větrnými podmínkami, v levém sloupci je pak stožár s výškou 80 m a v pravém 105 m vysoký stožár. Z obrázku je tak patrný rozdíl ve vyrobené energii, dosažený pouhou změnou výšky stožáru. [4]

1.9 Instalovaný výkon větrných elektráren v ČR

Budování větrných elektráren je na území České republiky omezeno různými faktory. Mezi ty podstatné se řadí povětrnostní podmínky a technické možnosti, dalšími ovlivňujícími faktory jsou různá společenská, ekologická či politická omezení. [35]

V porovnání s jinými státy, jako Německo či Nizozemí, nejsou v České republice tak ideální větrné podmínky. Vhodné lokality pro výstavbu větrných elektráren se i přes tato úskalí v naší zemi nalézají. Větrný potenciál lokalit ukazuje větrná mapa na obr. 1.6. Z této mapy je třeba vybrat oblasti, kde je potřebná roční průměrná rychlost větru ($6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a více), a vyloučit plochy těch území, která jsou z pohledu výstavby VTE zcela nevyhovující (jako národní parky, chráněné krajinné oblasti, vojenské prostory, velká letiště, rezervovaný vzdušný prostor s výškou spodní hranice a další) nebo se jeví jako velmi problematické. Výsledná mapa vhodných území pro stavbu větrných elektráren je znázorněna na obr. 1.7. Vhodná území zabírají rozlohu cca 5700 km^2 . [6], [35]

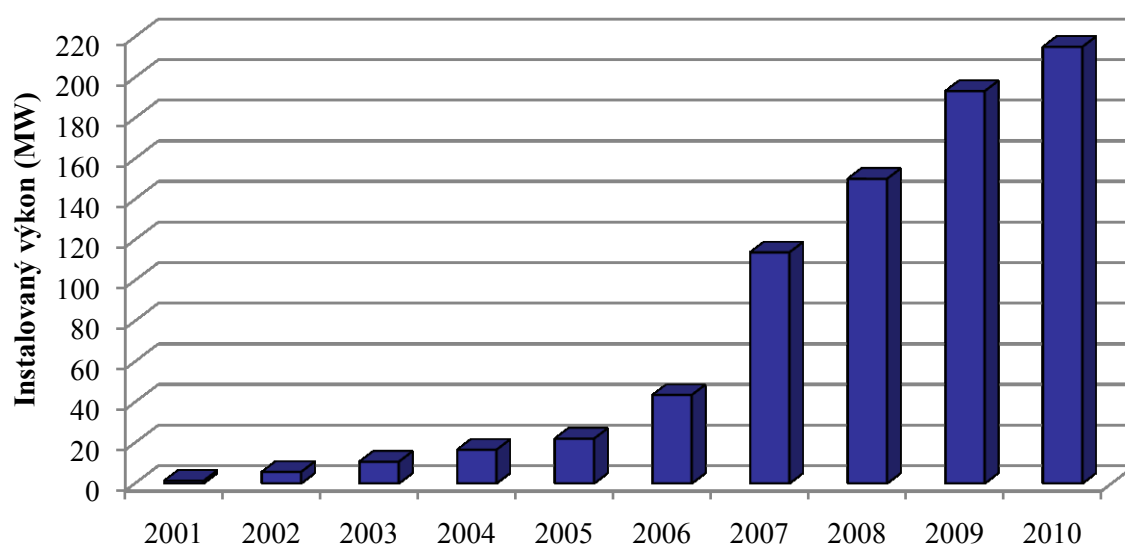
Při vyhovujících údajích o rychlosti větru získaných nepřímo pro uvažovanou lokalitu na výstavbu větrné elektrárny, se následně nevyhnutelně realizuje měření rychlosti větru bezprostředně v dané lokalitě. Měření by se mělo provádět alespoň rok, nejlépe s umístěním měřicího přístroje do výšky osy rotoru zamýšlené větrné elektrárny. [35]

Nicméně, počet těchto lokalit vhodných pro výstavbu větrných elektráren či větrných farem je omezený a to i přesto, že vlivem využití moderních řídicích systémů větrných elektráren s frekvenčními měniči není prvořadá velká nadmořská výška, protože pro výběr vhodné lokality je

možné využívat i území nížinaté. Můžeme říci, že v naší zemi s ohledem na stávající stav budou v blízké době téměř vyčerpány všechny kvóty pro realizační záměry výstavby. Pokud nastane tato situace, další zvyšování instalovaného výkonu bude založeno na využití již obsazených lokalit a náhradě doposud realizovaných větrných elektráren novou technologií s větším jednotkovým výkonem a lepší efektivitou využití větrné energie. [6]

Tab. 1.7 Instalovaný výkon VTE v ČR [9]

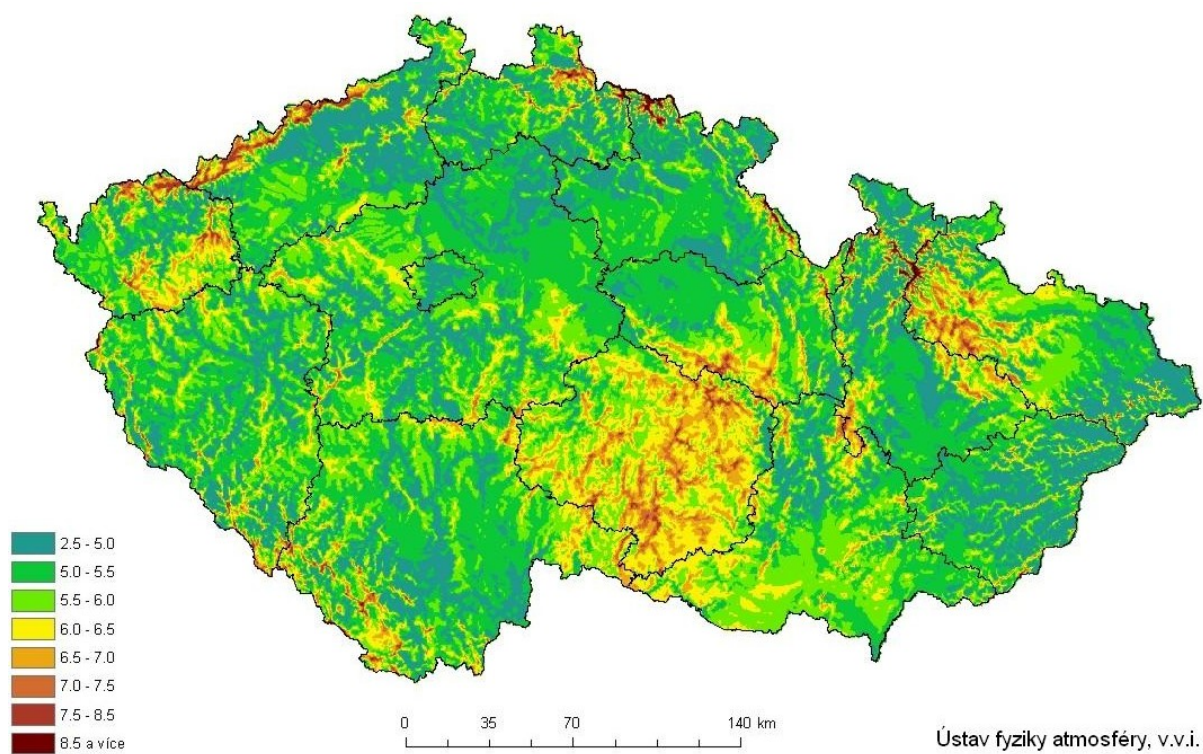
Rok	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Výkon (MW)	1,2	5,6	10,6	16,5	22	43,5	113,8	150	193,2	215



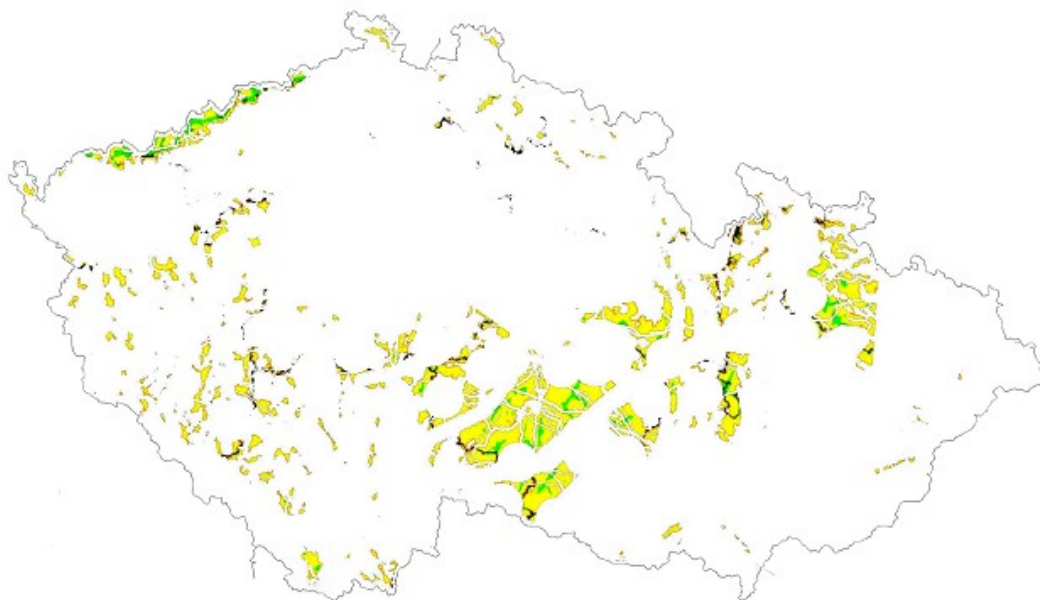
Obr. 1.5 Instalovaný výkon VTE v ČR celkem [9]

Poznámka: Údaje z roku 2010 jsou platné k 31. 12. 2010.

1.9.1 Větrná mapa

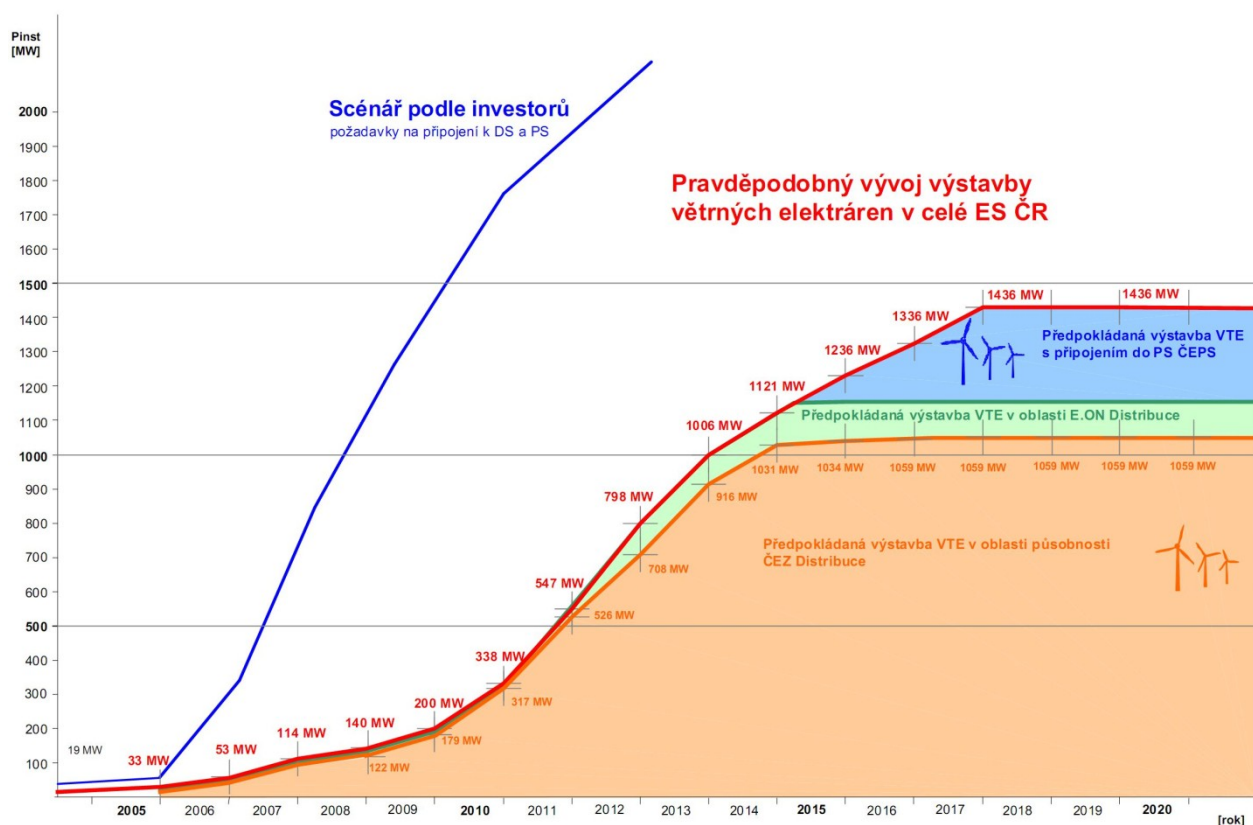


Obr. 1.6 Výsledné pole průměrné rychlosti větru v m/s ve výšce 100 m [8]



Obr. 1.7 Výsledná mapa území vhodných pro výstavbu VTE [35]

1.9.2 Předpokládaný vývoj výstavby větrných elektráren v ČR



Obr. 1.8 Pravděpodobný vývoj výstavby větrných elektráren v ČR [36]

Předpokládaný vývoj na obr. 1.8 vychází z údajů dostupných k datu 30. 09. 2009. Z aktuálních dat pro rok 2010 lze pozorovat značně optimistické údaje. Neočekával se tak obrovský nárůst žádostí o připojení fotovoltaických elektráren do distribučních sítí z důvodu výhodných vysokých výkupních cen elektrické energie. Jednotlivé termíny realizace projektů větrných elektráren se také posouvají. Tato zdržení vykazují skluz zhruba 3 roky. Za tuto dobu dochází ke změnám cen technologií, stavebních prací či výkupních cen. Ekonomika projektu se pak od původního návrhu může lišit. Z tohoto důvodu se podaří zrealizovat asi jeden z deseti projektů zamýšlené výstavby větrné elektrárny. [36]

1.9.3 Tabulka aktuálních instalací k 31. 12. 2010

Tab. 1.8 Seznam větrných elektráren v ČR [10]

SEZNAM VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN V ČR									
Lokalita	Kraj	Výrobce	Typ elektrárny	Rotor (m)	Výška (m)	Výkon (kW)	Počet	Celkový výkon (kW)	Instalace
Hostýn	Zlínský	Vestas	V 27-225	27	31,3	225	1	225	1993
Velká Kraš	Olomoucký	Vestas	V 29-225	29	30	225	1	225	1994
Ostružná	Olomoucký	Vestas	V 39-500	39	40	500	6	3000	1994
Mravenečník	Olomoucký	Energowars WindWorld		32	29	220+315+630	3	1170	1993-1996
Boží Dar - Neklid	Karlovarský	ENERGOVARS	EWT-315	32	29	315	1	315	2001
Protivanov I	Olomoucký	Fuhrlander	FL-100	21	35	100	1	100	2002
Jindřichovice pod Smrkem	Liberecký	Enercon	E-40	40	65	600	2	1200	2003
Nová Ves v Horách I	Ústecký	Repower	MD77	77	75	1500	1	1500	2003
Nová Ves v Horách II	Ústecký	Repower	MD77	77	75	1500	1	1500	2004
Mladoňov	Olomoucký	Tacke	TW 500	36	40	500	1	500	2004
Loučná	Ústecký	DeWind	D4	46	60	600	3	1800	2004
Vítkov (Lysý Vrch u Albrechtic)	Liberecký	TACKE	TW 500	37	40	5x500+600	6	3100	2004
Čížebná - Nový Kostel I	Karlovarský	Vítkovice	VE 315/2	30	33	315	1	315	2006
Čížebná - Nový Kostel II	Karlovarský	TACKE	TW 500	36	40	500	3	1500	2006
Potštát	Olomoucký	Bonus		20	30	150	3	450	2005, 2009
Protivanov II	Olomoucký	Repower	MD77	77	85	1500	2	3000	2005
Břežany	Jihomoravský	Vestas	V52	52	74	850	5	4250	2005
Hraničné Petrovice I	Olomoucký	Vestas	V52	52	74	850	1	850	2005
Hraničné Petrovice II	Olomoucký	Nordex	N54	54	60	850	1	850	2005
Petrovice	Ústecký	Enercon	E-70	71	85	2000	2	4000	2005, 2007
Žipotín-Gruna-Solitary	Pardubický	DeWind	D4	46	60	600	2	1200	2006
Nové Město - Vrch Tří pánů	Ústecký	Enercon	E-70	71	85	2000	3	6000	2006
Pavlov	Vysočina	Vestas	V90	90	105	2000	2	4000	2006
Pohledy u Svitav	Pardubický	Fuhrlander	FL 250	29	42	250	3	750	2004, 2006
Anenská Studánka	Pardubický	Fuhrlander	FL 250	29	42	250	2	500	2006
Rusová-Podmílešská výšina	Ústecký	Nordex	N80	80	80	2500	3	7500	2006
Drahany	Olomoucký	Vestas	V90	90	105	2000	1	2000	2006
Pavlov II	Vysočina	Vestas	V52	52	74	850	2	1700	2006

Lokalita	Kraj	Výrobce	Typ elektrárny	Rotor (m)	Výška (m)	Výkon (kW)	Počet	Celkový výkon (kW)	Instalace
Boží Dar II- Neklid	Karlovarský	Enercon	E-33	33,4	50	330	2	660	2006
Veselí u Oder	Moravskoslezský	Vestas	V90	90	80	2000	2	4000	2007
Gruna- Žipotín	Pardubický	DeWind	D8	80	80	2000	2	4000	2007
Stará Libavá - Rejchartice(Norberčany)	Moravskoslezský	Enercon	E-70	71	85	2000	1	2000	2007
Kryštofovy Hamry- Přísečnice	Ústecký	Enercon	E- 82	82	85	2000	21	42000	2007
Mníšek,Klíny	Ústecký	Enercon	E-70	71	85	2000	2	4000	2007
Klíny	Ústecký	Enercon	E-70	71	85	2000	1	2000	2007
Brodek u Konice	Olomoucký	DeWind	D4	46	42	600	2	1200	2007
Kámen	Vysočina	Vestas	V90	90	105	2000	1	2000	2008
Pchery	Středočeský	WinWind	WWD-3	88	100	3000	2	6000	2008
Maletín	Olomoucký	Vestas	V90	90	105	2000	1	2000	2008
Lipná	Olomoucký	Vestas	V90	90	105	2000	1	2000	2008
Anenská Studánka II	Pardubický	DeWind	D6	64	68	1250	4	5000	2008
TrojmezíA	Karlovarský	Vestas	V42	42	50	600	2	1200	2008
TrojmezíB	Karlovarský	Vestas	V63	63	60	1500	1	1500	2008
Bantice	Jihomoravský	Vestas	V90	90	105	2000	1	2000	2008
Hora Svatého Šebestiána	Ústecký	Nordex	S70	70	65	1500	3	4500	2008
Strážní Vrch v Nové Vsi v Horách	Ústecký	Repower	MM92	92	80	2050	4	8200	2008
Horní Částkov	Karlovarský	Vestas	V90	90	105	2000	2	4000	2009
Janov	Pardubický	Wikov	W2000spg	80	80	2000	2	4000	2009
Horní Loděnice - Lipina	Olomoucký	Vestas	V90	90	105	2000	9	18000	2009
Ostrý Kámen	Pardubický	DeWind	D6	64	68	1250	3	3750	2009
Věžnice	Vysočina	Repower	MM92	92	80	2050	2	4100	2009
Tulešice	Jihomoravský	Vestas	V90	90	105	2000	1	2000	2009
Mlýnský vrch, Krásná u Aše	Karlovarský	Vestas	V90	90	105	2000	4	8000	2009
Horní Částkov II	Karlovarský	Vestas	V90	90	105	2000	2	4000	2010
Boží dar III	Karlovarský	Enercon	E48	48		800	1	800	2010
Jinřichovice-Stará	Karlovarský	Enercon	E82	82	108	2300	4	9200	2010
Vrbice	Karlovarský	Enercon	E82	82	98	2300	2	4600	2010
Habartice u Krupky	Ústecký	Repower	MM92	92	80	2050	2	4100	2010
Celkový výkon (stav k 31. 12. 2010)							123	214310	

Po České republice jsou rozmístěny i mnohé další malé VTE, ale spíše pro vlastní spotřebu.

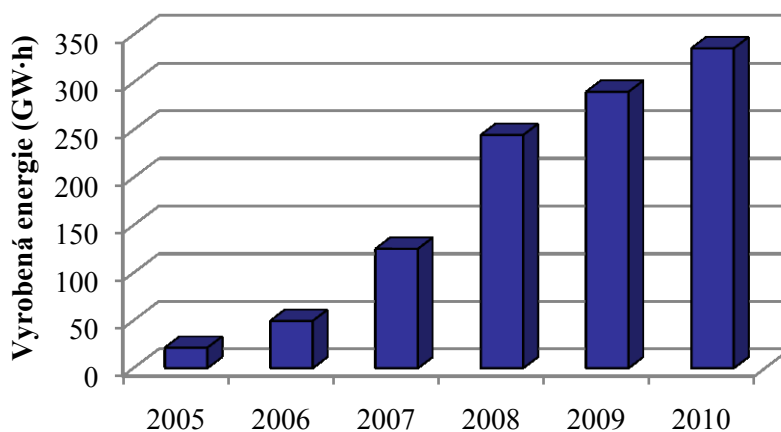
1.9.4 Výroba elektrické energie z větrných elektráren v jednotlivých měsících v roce 2008, 2009 a 2010

Tab. 1.9 Vyrobené elektrická energie z VTE v jednotlivých měsících [9], [11]

2008	Vyrobená el. energie (GW·h)	2009	Vyrobená el. energie (GW·h)	2010	Vyrobená el. energie (GW·h)
Leden	24,5	Leden	15,7	Leden	12,5
Únor	23,4	Únor	29,2	Únor	23,1
Březen	30,3	Březen	35,8	Březen	41,4
Duben	15,9	Duben	18,4	Duben	24,1
Květen	11,5	Květen	20,6	Květen	30,3
Červen	11,1	Červen	24,2	Červen	25,9
Červenec	17,4	Červenec	20,4	Červenec	17,1
Srpen	18,7	Srpen	17,1	Srpen	26,6
Září	13,4	Září	18,7	Září	30,2
Říjen	19,0	Říjen	33,9	Říjen	34,9
Listopad	28,9	Listopad	32,0	Listopad	36,5
Prosinec	30,5	Prosinec	23,9	Prosinec	33,2
Celkem	244,6 GW·h	Celkem	289,9 GW·h	Celkem	335,6 GW·h

Tab. 1.10 Vyrobená el. energie z VTE v ČR [9], [11]

Rok	Vyrobená el. energie (GW·h)
2005	21,3
2006	49,4
2007	125,1
2008	244,6
2009	289,9
2010	335,6



Obr. 1.9 Vyrobená el. energie z VTE v ČR [9], [11]

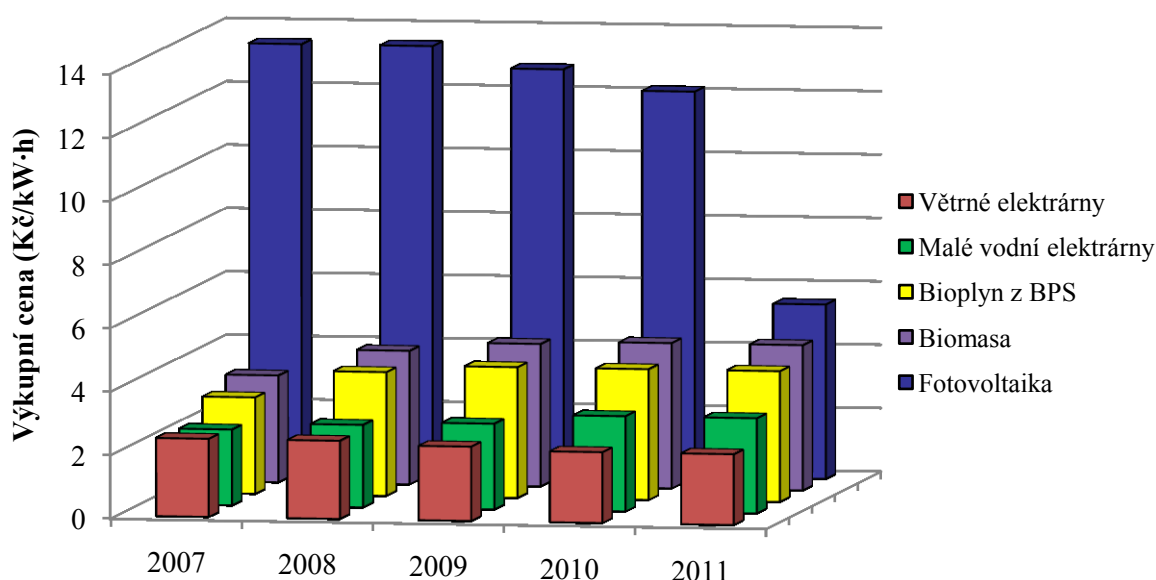
1.10 Vývoj výkupních cen energie z větrných elektráren a ostatních obnovitelných zdrojů

Tab. 1.11 Vývoj výkupních cen [11]

Zdroj	Cena 2007 CZK/kW·h	Cena 2008 CZK/kW·h	Cena 2009 CZK/kW·h	Cena 2010 CZK/kW·h	Cena 2011 CZK/kW·h
Fotovoltaika	13,46	13,46	12,79	12,15	5,50
Větrné elektrárny	2,46	2,46	2,34	2,23	2,23
Malé vodní elektrárny	2,39	2,60	2,70	3,00	3,00
Biomasa	3,37	4,21	4,49	4,58	4,58
Bioplyn z BPS	3,04	3,90	4,12	4,12	4,12

Poznámka: V případě rozmezí cen jsou uváděna maxima.

U fotovoltaiky je uvedena cena pro zdroj s instalovaným výkonem nad 100 kW.



Obr. 1.10 Vývoj výkupních cen v ČR [11]

1.11 Větrné elektrárny ve světě

Za rok 2010 bylo ve světě nově nainstalováno celkem 35 800 MW výkonu větrných elektráren, tomu odpovídá meziroční nárůst o 22,5 %. Instalovaný výkon větrných elektráren ve světě je tak celkem 194,4 GW. Roku 2010 měla Asie poprvé více instalací ve větru než tradiční světové trhy v Severní Americe či Evropě. [33]

Jako nejvyšších hodnot nově instalovaného výkonu ve větrných elektrárnách tak dosáhly Čína (16 500 MW), USA (5 115 MW), Indie (2 139 MW), Španělsko (1 516 MW) a Německo (1 493 MW). [33]

2. Metody predikce výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů pro větrné elektrárny

Pro predikci výroby elektrické energie z nestabilních zdrojů, kterými větrné elektrárny bezesporu jsou, se využívá celá řada matematických metod. Máme na mysli především takové metody, jejichž základ tvoří využití meteorologických modelů, statistických metod, časových řad, neuronových sítí či fuzzy logiky. Cílem těchto metod je minimalizovat chybovost předpovědní funkce. Ve světě se využívají různé predikční systémy. Pro predikci výroby elektrické energie, jestliže se zaměřujeme především na větrné elektrárny, hovoříme zejména o následujících systémech: PREDICTOR, ANEMOS Project, SCIROCCO, WPPT (Wind Power Prediction Tool), METEOLÓGICA, eWIND, SOWIE a mnoho dalších. [1], [32]

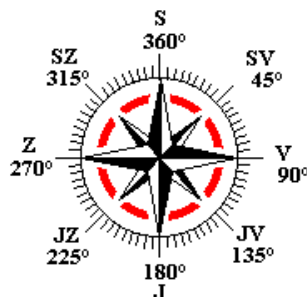
Na územích, pro která výpočtem určujeme predikci výroby elektrické energie, je nezbytná lokalizace predikčních modelů, které využívají všechny výše zmíněné systémy, což je i jejich zásadní nevýhodou. V současnosti nemáme žádný z těchto systémů lokalizován přímo v České republice, nejspíše z ekonomických důvodů. Lokalizace takto komplexního systému si vyžaduje nepřehledné množství meteorologických a elektrických měření. [1]

V České republice se jen několik institucí dlouhodobě zabývá predikcí elektrické energie, patří mezi ně především VŠB-TU Ostrava, Fyzikální ústav Akademie věd ČR a Západočeská univerzita v Plzni. [32]

2.1 Metodologie predikce výroby pro větrné elektrárny

U převážné většiny modelů sloužících k predikci výroby elektrické energie z větrných elektráren se jako vstupní data používají predikovaný směr a rychlosti větru z meteorologických modelů. [1]

Směr větru (odkud vítr vane) se obvykle značí pomocí úhlových stupňů, tzv. azimutů nebo pomocí světových stran. Například pod označením 90° rozumíme východní vítr, 180° vyjadřuje jižní vítr, 270° se používá pro západní vítr, 360° představuje severní vítr, 0° napíšeme, jestliže hovoříme o bezvětří apod. Směr větru se určuje pomocí větrných směrovek umístěných na stožárech. Měření se provádí ve výšce 10 metrů nad zemským povrchem tak, aby se zamezilo rušivému vlivu místních překážek, jemuž v těsné blízkosti povrchu bohužel zabránit nedokážeme. [27]



Obr. 2.1 Větrná růžice [29]

Rychlost větru je vzdálenost, kterou urazí pohybující se vzduch za jednotku času. Udává se v metrech za sekundu nebo kilometrech za hodinu a měří se pomocí anemometru. [27]



Obr. 2.2 Miskový anemometr

Anemometry pracují na těchto principech:

- Mechanický - větrem se roztáčí otočné miskové nebo vrtulové čidlo, jehož počet otáček za jednotku času je ve známé závislosti na rychlosti větru.
- Aerodynamický - rychlost větru se určí pomocí rozdílu mezi dynamickým tlakem ve speciálně konstruované aerodynamické trubici obtékané vzduchem a statickým tlakem v téže trubici za bezvětří.
- Zchlazovací - čidlem anemometru je drát vyhřátý na teplotu vyšší, než je teplota okolního vzduchu, přičemž čím je vítr větší, tím více se teplota drátu snižuje.
- Akustický - měří nebo odvozují rychlost a směr větru ze změn šíření zvuku v atmosféře.
- Značkovací - za pomoci tepelného a chemického značkování se určuje rychlost a směr vanoucího větru. [27]

Tab. 2.1 Beaufortova stupnice rychlosti větru [27]

Stupeň	Označení	Rozpoznávací znaky	Rychlost větru ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
0	Bezvětří	kouř stoupá kolmo vzhůru	0,0 - 0,2
1	Vánek	směr větru je patrný dle pohybu kouře	0,3 - 1,5
2	Slabý vítr	vítr je cítit ve tváři, listy stromu šelestí	1,6 - 3,3
3	Mírný vítr	listy stromů a větvičky jsou v trvalém pohybu	3,4 - 5,4
4	Dostí čerstvý vítr	vítr zvedá prach, pohybuje slabšími větvemi	5,5 - 7,9
5	Čerstvý vítr	listnaté keře se začínají pohybovat, na vodních plochách se tvoří menší vlny	8,0 - 10,7
6	Silný vítr	vítr pohybuje silnějšími větvemi, je obtížné používat deštník	10,8 - 13,8
7	Prudký vítr	vítr pohybuje celými stromy, chůze proti větru je namáhavá	13,9 - 17,1
8	Bouřlivý vítr	vítr ulamuje větve, chůze proti větru je téměř nemožná	17,2 - 20,7
9	Vichřice	vítr způsobuje menší škody na stavbách	20,8 - 24,4
10	Silná vichřice	stromy jsou vyvráceny, větší škody na stavbách	24,5 - 28,4
11	Mohutná vichřice	rozsáhlá zpuštění území	28,5 - 32,6
12	Orkán	ničivé účinky (odnáší střechy, hýbe těžkými hmotami)	32,7 a více

Bez použití přístrojů lze pomocí Beaufortovy stupnice odhadnout rychlost větru.

Časová variabilita rychlosti větru má charakter periodických změn, jež se projevují ve formě denního a ročního chodu. Přes periodické změny rychlosti větru se překládají aperiodické změny, které s ohledem na příčinný charakter procesů můžeme rozdělit na:

- Variabilitu rychlosti větru spojenou s vlivem cyklon a anticyklon na danou lokalitu. Doba vlivu rozměrově rozsáhlých cirkulačních objektů (1000 až 3000 km) je řádově několik dní.
- Variabilitu rychlosti větru spojenou s přechodem atmosférických front. Doba vlivu těchto atmosférických objektů v určité lokalitě je v průměru několik málo hodin úměrně šířce frontálního pásu (desítky až stovky kilometrů) a rychlosti, s jakou se tento objekt přemísťuje.
- Variabilitu rychlosti větru vyvolanou bouřkovou oblačností, bouřkami a přeháňkami. Doba vlivu těchto objektů, které ve většině případů bývají spojeny s atmosférickými frontami, je zhruba několik desítek minut. Nárazy větru mohou převyšovat $30 \text{ až } 40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
- Variabilitu rychlosti větru vyvolanou zesíleným prouděním v cirkulačních objektech typu tromby eventuelně tornáda. Doba vlivu bývá několik minut. Nárazy větru mohou převyšovat $30 \text{ až } 40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
- Variabilitu rychlosti větru vyvolanou malorozměrnou turbulencí. Doba vlivu je pár desítek sekund a méně. [30]

Měření rychlosti větru nejsou primárně určena pro potřebu větrné energetiky, z tohoto důvodu není jejich umístění zpravidla příliš optimální. Měření větru se provádí i na samotných strojovnách větrných elektráren, to však slouží především pro regulaci provozu samotné elektrárny. [28]

Oproti tomu modelování větru je mnohem operativnější, i když výsledky jsou méně přesné než dobře provedené měření. Výpočet se navíc může provést v místech, kde není možné měření. Možnosti modelů jsou omezeny složitostí reálných podmínek a výkonností výpočetní techniky. Použití meteorologických modelů je například pro předběžné určení větrných poměrů dané lokality, tvorbu plošných „větrných map“, zjištění větrného potenciálu lokality či pro přesné výpočty v rámci větrné farmy (jako přepočet z místa stožárového měření na individuální elektrárny a predikci výroby elektrické energie). [28]

Existuje celá řada meteorologických modelů, z nichž každý má své pro a proti. K těm nejznámějším se řadí například: HIRLAM, ECMWF, GFS, UMPL, WRF nebo Aladin, který se využívá i v České republice. Tyto uvedené modely svou předpověď poskytují data pro území Evropy.

[1]

Podstatným parametrem pro přesnost predikce výroby elektrické energie je velikost predikčního čtverce daného meteorologického modelu. V predikčním čtverci jsou pak pro zjednodušení meteorologické podmínky považovány za konstantní. Běžnou velikostí sítě těchto kvazi čtverců je rozměr $9 \times 9 \text{ km}$. [1]

Meteorologické modely nám na svém výstupu dají údaje o rychlosti a směru větru pro daný čas a predikční čtverec. Tím, že jsou údaje identické pro celý predikční čtverec, je nutné pomocí systému korekcí údaje lokalizovat pro danou větrnou elektrárnu či větrnou farmu. Volba použité korekce závisí na daném predikčním modelu. Mezi ty základní patří:

- Korekce rychlosti a směru větru pro danou VTE v důsledku umístění sledované VTE v daném čtverci,
- korekce rychlosti větru vzhledem ke směru větru,
- korekce rychlosti vzhledem k výšce náboje VTE,
- korekce rychlosti větru vzhledem k aktuální teplotě a tlaku vzduchu. [1]

Každá z těchto korekcí má jiný vliv na výslednou přesnost předpovědi rychlosti a směru větru. Nejvíce se projevuje vliv korekce vzhledem ke směru větru a korekce na umístění sledované větrné elektrárny v daném čtverci. Výpočet uvedených dvou korekcí je nejobtížnější. Oproti tomu je výpočet

korekce rychlosti vzhledem k výšce náboje a korekce na aktuální teplotu a tlak poměrně snadný, nedopouštíme se u něj tak zásadních chyb. [1]

2.2 Meteorologické modely

Meteorologická předpověď je fyzikální úlohou, jejímž úkolem je vytvořit co nejpravděpodobnější stav budoucího vývoje atmosféry. Využívají se při ní základní fyzikální zákony, například pohybové zákony a zákony termodynamiky. Řeší se pomocí matematiky nebo eventuálně za pomoci znalostí chování synoptických objektů jako tlakové útvary, fronty či bouřky. [13]

Podle časového období, na které je předpověď vydána, rozlišujeme:

- Velmi krátkodobá: 0-12 h
 - využití numerických modelů, metod dálkové detekce (radary, družice, systémy detekce blesků), koncepčních modelů (vliv "klasické" synoptické metody)
- Krátkodobá: 1-3 dny
 - dominantní využití numerických modelů
- Střednědobá: 3-15 dnů
 - dominantní využití numerických modelů, využití poznatků z teorie deterministického chaosu k odhadu pravděpodobnosti jednotlivých scénářů vývoje
- Dlouhodobá: měsíční, sezónní
 - využívá poznání určitých vazeb mezi některými složkami klimatického systému [13]

Obecně jsou chyby numerických předpovědí způsobovány chybami samotného modelu (omezené rozlišení modelu, parametrizace fyzikálních procesů: procesy, které nelze rozlišit v důsledku velkého kroku - konvekce nebo které neumíme přesně matematicky vyjádřit, popřípadě u kterých známe jen rámcově velikost vlivu), nepřesnou znalostí výchozího stavu atmosféry či nedostatkem pozorování nad oceány a další. [15]

Numerické předpovědní modely počasí můžeme rozdělit na lokální modely, simulujících vývoj počasí na relativně omezeném území, ale zato v relativně podrobném rozlišení s mřížkou řádově s rozměrem 10 km. Do této skupiny modelů lze řadit český ALADIN, německý DWD LM (Deutscher Wetterdienst Lokal Modell), skandinávský HIRLAM nebo podrobný a poměrně přesný pro území České republiky polský model ULPM. [22]

Mimo lokálních modelů máme modely globální, simulující vývoj atmosféry na celé Zemi. Z důvodu příliš dlouhých a složitých výpočtů mají tyto modely většinou menší rozlišení asi 40 km mřížky, ale kompenzují to také delším předpovědním obdobím. Například americký numerický model GFS poskytuje předpověď až na 384 hodin, společný evropský model ECMWF na 240 hodin a britský Bracknell na 132 hodin dopředu. Globální modely vedle toho často poskytují i variantní simulace (v případě ECMWF 50 takzvaných ensemblových běhů). [22]

Jako vstupní data slouží pro jednotlivé modely všechny naměřené údaje z meteorologických stanic, radarů, družic a především balónových sond, které poskytují údaje o stavu atmosféry ve vyšších vrstvách. Za pomoci počítačové simulace vývoje atmosféry je úkolem modelů vypočítat stav atmosféry do budoucna. Dynamické jádro modelu tvoří mnoho fyzikálních rovnic. Pro samotnou předpověď je východiskem aktuální stav atmosféry. [22]

Výstup z modelu pak tvoří různé barevné mapky, na kterých je pomocí barev a jejich odstínů zakreslen předpokládaný srážkový úhrn, teplota, rychlost a směr větru, tlaková pole a další meteorologické prvky a ukazatele. [22]

O numerických předpovědních modelech se dá říci, že jsou v podstatě vůbec nejsložitějšími počítačovými programy na světě. Proto jsou řešeny na tzv. superpočítačích, tedy na těch nejvýkonnějších počítačích, které byly člověkem doposud zkonstruovány. [22]

2.2.1 ALADIN

V České republice jsou pro předpovědi počasí nejčastěji používány výstupy z numerického předpovědního modelu počasí ALADIN (Aire Limitée, Adaptation Dynamique, Development International). Výstupy z modelu jsou počítány v České republice a model je určený pro krátkodobou předpověď na 54 hodin dopředu. ALADIN je propojen s globálním modelem francouzské meteorologické služby Meteo-France tzv. ARPÉGE modelem. Tvoří podrobný model pro území střední Evropy a je vyvíjen od roku 1991 v mezinárodní spolupráci, proto mají svůj vlastní model ALADIN i jiné země než Česká republika, například Rakousko, Slovinsko, Rumunsko či Slovensko. Z českého ALADINU lze nalézt předpovědi teploty vzduchu ve 2 metrech nad zemí, srážky za posledních 6 hodin, vítr v 10 metrech nad zemí a oblačnost. Aktualizace probíhá po 6 hodinách na následujících 54 hodin. ALADIN je typickým představitelem skupiny lokálních modelů, které simulují vývoj počasí na relativně omezeném území jako Evropy, ale zato v relativně podrobném rozlišení s mřížkou řádově s rozměrem 7 až 10 km. [22]

Základní koncepcí byla dynamická adaptace výsledků předpovědi z globálního modelu ARPEGE na vyšší rozlišení. V jednotlivých zemích se předpovědi zpřesňují pro konkrétní území. Vyšší rozlišení má pozitivní vliv na zpřesnění popisu atmosférických procesů s velkou prostorovou proměnlivostí a procesů vázaných na podrobný popis parametrů zemského povrchu (výška krajiny, půdní a vegetační parametry apod.). Vyvíjeny jsou metody zpřesnění počátečních podmínek asimilací pozorování (třidimensionální variační asimilace dat, asimilace ve smyslu přizpůsobení, splnutí), také sofistikovaná kombinace globální analýzy a simulace mezoměřítkových struktur (metody míchání, tzv. blending). Model ALADIN je založen na systému základních rovnic. Rovnice jsou řešeny spektrální metodou na vymezené oblasti semi-implicitním a semi-lagrangeovským schématem. Procesy, které nepopisuje základní dynamické jádro modelu, jsou pak simulovány v soustavě fyzikálních parametrizací. [23]

Fyzikální parametrizace:

- Zahlazená střední orografie,
- parametrizace přenosu gravitačních vln generovaných subgridovou orografií,
- implicitní spektrální horizontální difúze,
- vertikální turbulentní difúze a parametrizace mělké konvekce,
- konstantní teplota oceánu a množství oceánického ledu,
- komplexní submodel výměny tepla a vody v systému půda - biosféra - atmosféra,
- parametrizace sněhové pokrývky,
- schéma radiačního přenosu a transformace záření,
- parametrizace hluboké konvekce,
- parametrizace velkoprostorových srážek,
- diagnostické schéma oblačnosti. [34]

V rámci projektu ALADIN-2 se vyvíjí nové modely pro modelování počasí na omezené oblasti s různou specializací. Vedle dalšího vývoje modelu ALADIN/ALARO pro předpověď v celoevropském měřítku na 2 dny (s prostorovým krokem modelové sítě 5 až 10 km) vzniká v Météo-France model AROME, určený pro předpověď počasí na národních oblastech s velmi vysokým rozlišením (2,5 km). [23]

Odkaz na internetové stránky dostupnosti modelu < <http://www.cnrm.meteo.fr/aladin/>>,
< <http://pr-asv.chmi.cz/aladin/index.php>>.

2.2.2 HIRLAM

Mezinárodní výzkumný program HIRLAM (High Resolution Limited Area Model) vznikl spoluprací v oblasti výzkumu evropských meteorologických ústavů. Cílem programu HIRLAM je rozvíjet a udržovat systém numerických předpovědí počasí predikčním modelem pro využití v zúčastněných meteorologických ústavech. Program byl zahájen v roce 1985 a v posledních dvou desetiletích prošel mnoha fázemi. Mezi zúčastněné meteorologické instituty jednotlivých zemí patří: Dánsko, Estonsko, Finsko, Island, Irsko, Nizozemsko, Norsko, Španělsko, Švédsko, Lotyšsko a Litva.

[16]

Vědecké cíle programu HIRLAM:

- Vývoj modelu při horizontálním rozlišení 2,5 km (HARMONIE),
- pokračující vývoj modelu HIRLAM synoptické stupnice (horizontální rozlišení 5 až 15 km),
- vývoj vhodného krátkodobého modelu s předpovědí pro omezené oblasti, vhodného zejména pro nepříznivé počasí (GLAMEPS). [16]

Model HIRLAM je hydrostatický model v uzlových bodech, který má dynamické jádro založeno na semi-implicitním a semi-lagrangeovským schématem základních rovnic. Volitelně se používá Eulerovy dynamické rovnice. [17]

Předpovídané proměnné horizontální složky větru u , v , teploty T , měrné vlhkosti q a linearizovaného geopotenciálu G jsou definovány ve všech úrovních modelu. Tlak p , geopotenciál Φ a vertikální rychlost větru se vypočítávají „napůl“ úrovních modelu. Rovnice jsou popsány pro obecnou mapu, v praxi se používá lat-lon rotující mřížky. [17]

V Modelu jsou zapracovány tyto fyzikální procesy jako radiační schémata, marky a kondenzace, turbulence, povrchové a půdní procesy, orografické členění a další.

Asimilace dat

Výchozí asimilace dat v modelu HIRLAM je pomocí 4D-VAR asimilací. Statistiky chyb se vypočítávají tzv. NMC metodou. Typy dat, které v současnosti ve výchozím nastavení vstupují do modelu, jsou TEMP, SYNOP, AIREP, PILOT, SATOB, SHIP, DRIBU a AMSU-A/ATOVS nad mořem. Navíc je možné asimilovat AMSU-A nad pevninou a mořským ledem, AMSU-B, geostacionární a MODIS atmosférické vektory pohybu, SEVIRI, GPS souřadnice a větrné profily. Data se aktualizují pomocí satelitních pozorování a dat z měřicích stanic. Rozbor povrchových proměnných počasí se dělá pomocí parametrů T2m a RH2m, povrchové teploty mořské vody, výšky sněhové pokrývky, teploty půdy a půdní vlhkosti. [17]

Počáteční a okrajové podmínky

Počáteční a okrajové podmínky jsou zpravidla převzaty z modelu ECMWF nebo ve větším měřítku modelem HIRLAM.[17]

Aby bylo možné model použít pro běžné numerické předpovědi počasí, modelové analýzy a prognózy, byl kód zakotven v systému skriptů, spustitelných souborů, knihoven, dokumentací a nástrojů. Celý systém HIRLAM musí být použitelný ve všech ústavech HIRLAM, jak pro provozní, tak výzkumné aplikace. K dispozici je standardní verze modelu HIRLAM, která je označována jako referenční systém. Tento referenční systém (který se skládá z kódů, skriptů, knihoven a nástrojů) je udržována na serveru HIRLAM, na ECMWF a na FMI, kde je spuštěn jako funkční model HIRLAM. Systém obsahuje také řadu nástrojů pro monitorování a ověřování modelů předpovědi a využití dat.

[17]

Odkaz na internetové stránky dostupnosti modelu < <http://hirlam.org/>>.

2.2.3 ECMWF

Model ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) je vytvořen Evropským centrem pro střednědobé předpovědi počasí (tj. předpověď je na 3 až 10 dní).

Předpovědní systém ECMWF se skládá ze tří základních částí:

- Příprava a asimilace dat,
- globální cirkulační model,
- ansámblový předpovědní systém.

Na vstupu globálního modelu je značné množství dat - SYNOP, TEMP, SHIP a další. Letecká a družicová měření mají značný vliv na zvýšení kvality předpovědí. Mezi nejdůležitější zdroje dat pro tento model se řadí družice s (pseudo)polární dráhou. To umožňuje získat data i v místech s nedostatkem klasických měření, jako jižní polokoule a oceány. Důslednou kontrolou kvality procházejí všechna měření. [13], [15]

Data se vyřazují:

- Jednorázově, na základě srovnání s modelovým polem (předchozí krátkodobou předpovědí), se sousedními pozorováními i s jinými typy dat (hydrostatická kontrola TEMP dat apod.),
- trvale nebo dočasně (podle měsíční aktualizace). [15]

Pro výpočet předpovědi je výchozí analýza (počáteční stav) získávána 4D VAR asimilací dat. Provádí se dvakrát denně a to na základě dat z času 03:00 a 15:00 UTC (tzv. asimilační okno). Pro běh modelu jsou potřebné hodnoty meteorologických prvků. Ty se nezjišťují jen z aktuálního měření, pozorování a jejich přepočtem do pravidelné sítě, ale i tak, že do vypočtené sítě z minulého běhu modelu se asimilují (přizpůsobí) hodnoty aktuálnímu stavu, zjištěné v době nového běhu. [15]

Aktualizace předpovědi probíhá dvakrát denně na 10 dní dopředu, hlavní termín je 12:00 UTC a 00:00 UTC. Hlavní (deterministická, kde každý stav je určen předcházejícím) předpověď se počítá pomocí globálního modelu T511 L60, u označení je T511 tzv. vlnové číslo, které ukazuje na velikost horizontálního rozlišení modelu (zde 40 km), L60 značí počet hladin modelu (zde 60 od země) až po hladinu 0,1 hPa (přibližně do výšky 64 km), z toho je 12 rovin pod úrovní hladiny 850 hPa. Časový krok je určen na 15 minut. [15]

Pokud nastanou i malé chyby či nepřesnosti ve výchozím stavu, například nad Amerikou, mohou během několika dnů předpovědi narůst v rozsáhlejší chyby nad Evropou, proto se systém tzv. ansámblových předpovědí (EPS) snaží tyto chyby předvídat. Základ tvoří výpočet 50 či experimentálně 100 nepatrně pozměněných předpovědí. Tyto analýzy se vypočítávají z výchozí analýzy. Podmínkou je, aby v rozsahu dané přesnosti měření byla zadána velikost odchylek meteorologických dat. Při samotném výpočtu se snaží po dobu 48 hodin identifikovat dynamicky nestabilní regiony. Používá se přitom metoda tzv. „singulárních vektorů“. Poté se vyberou případy, jejichž změna je ta největší a spočítá se oněch 50 nepatrně pozměněných předpovědí, které tvoří základ systému ansámblové předpovědi (EPS). Využívá se modelu s menším rozlišením T255 L40 (80 km, 40 hladin). Výsledky ansámblových předpovědí mají snahu postihnout míru úspěšnosti předpovědi, jež je závislá hlavně na výchozím stavu atmosféry a na možnosti matematicky přesně namodelovat všechny vlivy působící na další vývoj počasí. U správnosti předpovědi nastávají odchylky ze zjištěného nepřesného výchozího stavu atmosféry a nemožnosti namodelovat všechny působící vlivy. Výstupem z hlavního modelu je jen jeden možný scénář predikovaného vývoje počasí, máme tedy na další období jedinečnou (deterministickou) předpověď. Míru pravděpodobnosti této předpovědi a také možné další varianty, které mohou nastat, se z tohoto scénáře poznat nedají. [15]

Užití přímých výstupů oněch 51 předpovědí (50 členů EPS + 1 výstup hlavního modelu) není snadné i vlivem jejich vysokému počtu a časového omezení meteorologa. Za předpokladu, že předpovídáme na 10 dní dopředu a omezíme se jen na jednu hladinu, znamená to mít 510 grafických předpovědí. A to se uvažuje pouze o jednom meteorologickém prvku v jediné hladině. V praxi to ovšem znamená, že meteorolog se může jen podívat, jaká část členů dává cyklonální nebo anticyklonální vývoj. [15]

Odkaz na internetové stránky dostupnosti modelu < <http://www.ecmwf.int/>>.

2.2.4 GFS

Písmenné označení značení GFS znamená Global Forecast System. Model je veden americkou společností NCEP (National Centers for Environmental Prediction), jednou ze složek NWS (National Weather Service), organizace spadající pod americkou agenturu pro výzkum atmosféry - National Oceanic and Atmospheric Organization (NOAA). Předpovědi se vypočítávají čtyřikrát denně v časech: 00:00 UTC, 06:00 UTC, 12:00 UTC a 18:00 UTC. Výhoda GFS modelu je, že dokáže vypočítat předpověď počasí až na 384 hodin dopředu, provádí tak výpočet dlouhodobých modelů pro celý svět. Vnitřně používá pro předpovědi do 84 hodin rozlišení cca 55 km, do 180 hodiny 80 km a více jak 180 hodin dopředu rozlišení 110 km. GFS model se počítá na doméně -90...90 SŠ a -180...180 ZD, tedy globálně. Mezi jeho majoritní výhody patří uplatnění pro předpověď na jakékoliv místo na Zemi, model je globální pro celou zeměkouli. [18]

Použitá data z modelu GFS s rozlišením cca 100 km mohou být dále zjemňována pomocí plošné interpolace, na rozlišení s přesností do 50 km, s přihlédnutím k aktuální orografii a základním klimatickým parametrům dané oblasti, čímž dochází k dalšímu zjemnění výsledků. Základní meteorologické prvky a vypočtené hodnoty jsou pak dle vlastních algoritmů přepočítávány a upravovány pro specifické potřeby. [18]

Odkaz na internetové stránky dostupnosti modelu < <http://www.emc.ncep.noaa.gov/>>.

2.2.5 MEDARD

Název je odvozen od patrona dobrého počasí sv. Medarda (Meteorological and Environmental Data Assimilating system for Regional Domains). Jádrem systému tvoří numerický předpovědní model počasí MM5 (PSU/NCAR) konfigurovaný pro Českou republiku. [19]

MM5 je numerický model atmosféry, využívaný pro účely předpovědi počasí. Model byl vyvinut na Pennsylvania State University/National Center for Atmospheric Research (PSU/NCAR) v USA, kde vývoj probíhá od sedmdesátých let. Počáteční a okrajové podmínky jsou získávány z NCEP (National Center for Environmental Prediction, USA). Označení „MM“ v názvu modelu znamená Mesoscale and Microscale, tedy střední a malé oblasti modelování. Model byl speciálně navržen pro regionální předpověď počasí a v současnosti je celosvětově používán desítkami významných institucí. [19]

Orografie (elevace terénu) a fyziografická data modelu

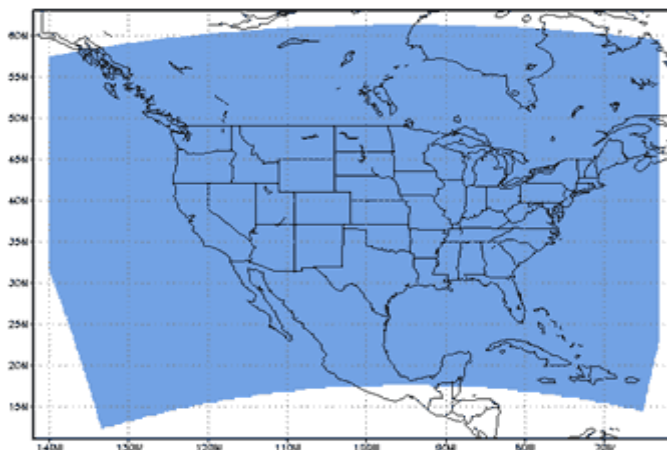
Konfigurace modelu MM5 pracuje na dvou do sebe vřazených oblastech (doménách). První pokrývá o něco větší oblast než střední Evropu, mřížka má rozměry 60 x 85 km a rozlišení 27 km. Druhá pokrývá zhruba Českou republiku, mřížka má rozměry 67 x 79 km a rozlišení 9 km. Pro získání údajů o výšce terénu jsou použita data z USGS (United States Geological Survey), která mají rozlišení 30 vteřin, tomu odpovídá cca 900 m. Z nich se dostane velmi přesný profil terénu, jsou tak zachyceny útvary, jako například podkrušnohorský zlom. Při rozlišení mřížky 9 km není naplno využita přesnost modelu terénu, přesto je modelová orografie lepší, než při použití mřížky s hrubším rozlišením terénu. Identický zdroj dat a shodné rozlišení je použito pro pokrytí terénu, který je rozdělen na 24 kategorií, jako například vodní plochy, různé typy zemědělských a lesních ploch, zástavba, skály atd. [19]

Odkaz na internetové stránky dostupnosti modelu < <http://www.medard-online.cz/>>.

2.2.6 NAM

NAM (North American Mesoscale) je regionální model, jehož provozovatelem je americký NCEP (National Center for Environmental Prediction). Pokrytá oblast je nad Severní Amerikou v rozlišení cca 12 km. Aktualizace dat probíhají čtyřikrát denně v časech: 00:00 UTC, 06:00 UTC, 12:00 UTC a 18:00 UTC. Poskytuje daleko vyšší rozlišení než model GFS a proto by měl poskytovat výrazně vyšší míru úspěšnosti krátkodobé předpovědi. [21]

Odkaz na internetové stránky dostupnosti modelu < <http://www.emc.ncep.noaa.gov/>>.



Obr. 2.3 Mapa pokrytí modelu NAM [21]

2.2.7 NMM-3

NMM 3 je numerický model, jehož písmena NMM v názvu znamenají „Numerical Meso-Scale Modelling“. Pro svou přesnost (rozlišení mřížky 3 km) se používá hlavně pro regionální předpovědi a pokrývá i oblast České republiky. Výstupy modelu zpracovává švýcarská firma Meteoblue se sídlem v Basileji. Aktualizace předpovědního modelu probíhá dvakrát denně v časech 04:00 UTC a 15:00 UTC. [20]

Odkaz na internetové stránky dostupnosti modelu < <http://www.meteoblue.com/>>.

2.2.8 UMPL

Matematický model UMPL (Unified Model for Poland Area) je vlastně zmenšená verze modelu vyvinutého a používaného ve Velké Británii pro meteorologické služby (Unified Model - UM) pro Polsko.

V současné době bere tento model v úvahu tyto fyzikální procesy:

- Model zemského povrchu - má implementován model prognózy teploty a vlhkosti země, informace o různých typech půd pro stanovení povrchu, součástí systému je model pokrytí vegetací (vlhkost může být uchovávána ve vegetaci nebo je přenesena do atmosféry).
- Mezní vrstvy - turbulence vertikálního pohybu mezní vrstvy záleží na Richardsonově čísle, při výpočtu se bere v úvahu přítomnost či nepřítomnost mraků.
- Oblačnost a srážky - je definována jako funkce obsahu vody nebo ledu v mraku.
- Konvekce - konvekční procesy jsou namodelovány v jednoduchém modelu mraky, konvekce ovlivňuje atmosféru seskupením vzduchu s mraky, odpařování a srážky.
- Záření - pro výpočet přenosu záření do atmosféry se používá 6 pásem dlouhovlnného záření a 4 pro záření slunce. Přihlíží se na vliv vodní páry, ozonu, oxidu uhličitého a mraků.
- Horizontální difuze - je prezentována v závislosti na stupnici filtrování.
- Vertikální difuze – někdy je potřeba k odstranění kmitání způsobeném nepřesným řešením pro vnitřní gravitační vlny. Vyhlazené je pouze pole větru. [5]

Dobře je v modelu zpracována interakce mezi meteorologickými veličinami. Vítr, déšť, oblačnost, teplota a tlak jsou umístěny přehledně v jedné tabulce.

Odkaz na internetové stránky dostupnosti modelu < <http://new.meteo.pl/>>.

2.2.9 WRF

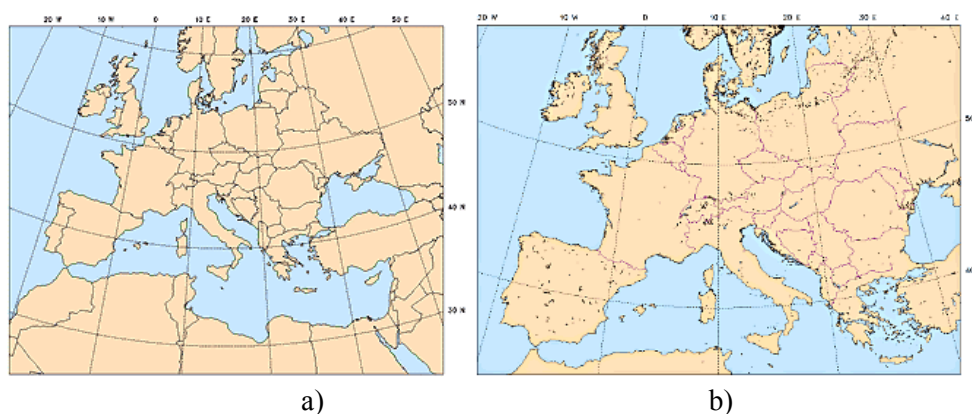
Předpovědní model WRF (The Weather Research and Forecasting Model) zastoupil model MM5. Na jeho vývoji se podílejí organizace jako: National Center for Atmospheric Research (NCAR), the National Oceanic and Atmospheric Administration, the National Centers for Environmental Prediction (NCEP), the Forecast Systems Laboratory (FSL), the Air Force Weather Agency (AFWA), the Naval Research Laboratory, Oklahoma University či Federal Aviation Administration (FAA). [21]

Model WRF pokrývá většinu Evropy a Středomoří v rozlišení 27 km. Další oblastí, pokrytou modelem WRF s vyšším rozlišením 9 km, jsou například Kanárské ostrovy, část Marockého pobřeží a Madeira. Druhá doména je menší, rozlišení má shodné (9 km), a pokrývá severní část Rudého moře s

částí Egypta, Libanon, Izrael, a jih Kypru. Výchozí a okrajové podmínky jsou pro výpočet získány z modelu GFS. Aktualizace modelu WRF probíhá pravidelně čtyřikrát za den ve 03:20 UTC, 09:20 UTC, 15:20 UTC a 21:20 UTC. Predikované předpovědi jsou na 78 hodin s krokem po 1 hodině. V předpovědi jsou obsaženy informace o rychlosti a směru větru, nárazy větru, teplota, celková oblačnost a srážky. Na dalším modelu s rozlišením 12 km postihující Argentinu, Chile a Uruguay se pracuje. [21]

Nejvyšší rozlišení modelu je 3 km. Takové vysoké rozlišení vyžaduje masivní množství výpočetní techniky, proto dotčené oblasti nemůžou být velmi velké. Model WRF s rozlišením 3 km pokrývá i Českou republiku, předpovídá příštích 48 hodin a aktualizuje se čtyřikrát denně. [21]

Odkaz na internetové stránky dostupnosti modelu < <http://www.wrf-model.org/index.php> >.



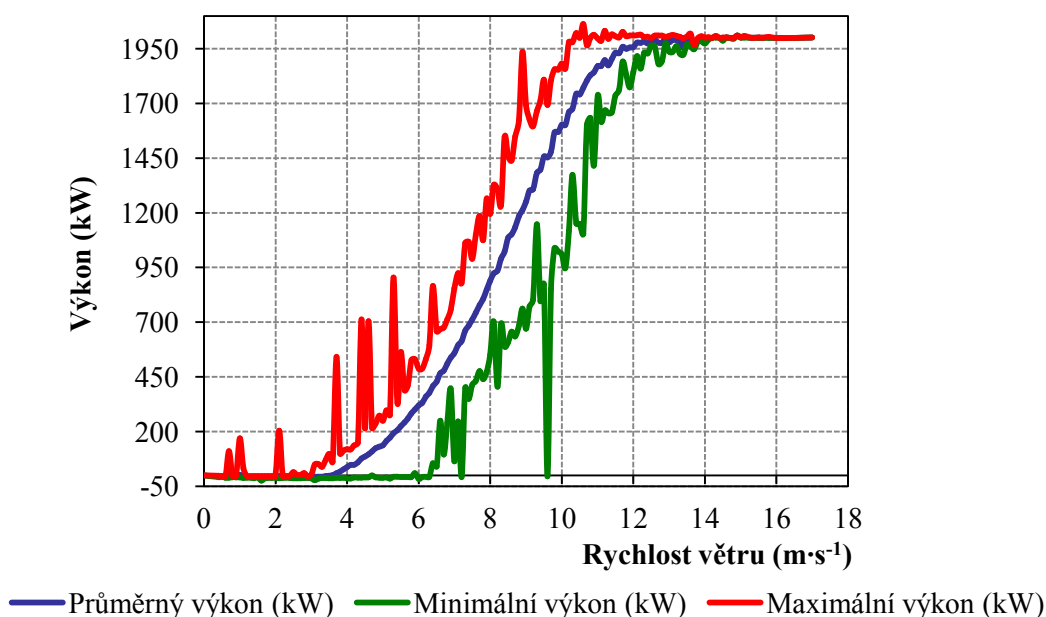
Obr. 2.4 Oblast pokrytí modelem WRF s rozlišením a) 27 km, b) 9 km [21]



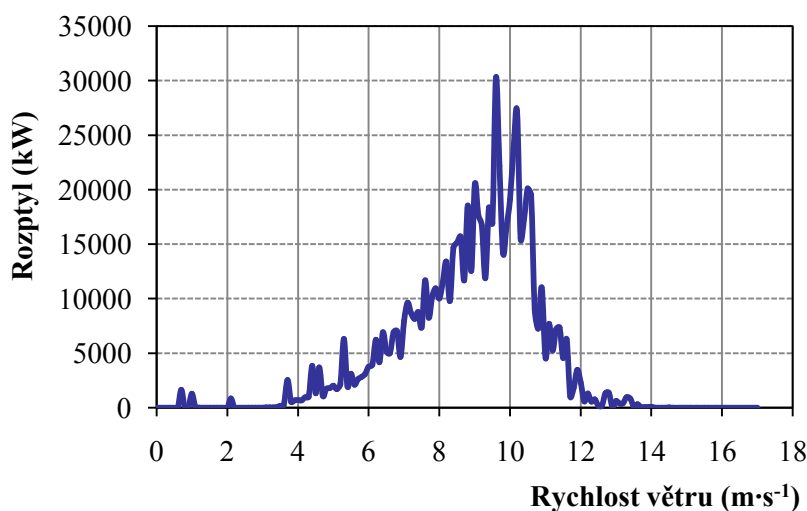
Obr. 2.5 Model WRF s rozlišením 3 km [21]

3. Návrh predikčního modelu

Predikční model je navrhován pro jednotlivé typy větrných elektráren, umístěných na určitém území s tím, že je potřeba znát jeden ze základních parametrů definujících účinnost přeměny větrné energie na energii elektrickou, tedy výkonovou křivku konkrétní větrné elektrárny. Jednotlivé typy větrných elektráren mají různé výkonové křivky. Výkonová křivka je pro konkrétní typ větrné elektrárny definována jako závislost elektrického výkonu elektrárny pro danou rychlost větru.



Obr. 3.1 Výkonová křivka větrné elektrárny (2 MW) [1]



Obr. 3.2 Rozptyl z výkonu

Výkonová křivka na obr. 3.1 byla sestavena za pomoci meteorologických údajů a databáze naměřených hodnot toku výkonu. Z tohoto obrázku lze například odečíst startovací úroveň větrné elektrárny (při rychlosti větru $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), tedy kdy větrná elektrárna v závislosti na rychlosti větru začne

přeměňovat energii. S rostoucí rychlostí větru dochází k lineárnímu navýšení výstupního výkonu až do určité hodnoty (v tomto případě do rychlosti větru $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), kdy je natočením lopatek větrného motoru omezena hodnota mechanického výkonu (tzv. aerodynamická brzda, která neubrzdí větrný motor k úplnému zastavení, ale zabrání nebezpečnému mechanickému přetížení rotoru). Součástí vybavení větrné elektrárny je mechanická brzda, která je schopna za jakýchkoliv povětrnostních podmínek rotor zabrzdit. Zpravidla je umístěna za převodovkou na straně generátoru, je disková a spouští se přes pružinu při poklesu hydraulického tlaku. Při zvýšení rychlosti větru nad určitou mez dojde k odstavení větrné elektrárny, takto odstavená větrná elektrárna musí odolávat rychlosti větru až $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. [1]

3.1 Korekce rychlosti vzhledem k výšce náboje VTE

Velikost výšky nábojů větrných elektráren roste současně s velikostí výkonu větrných elektráren. [1]

Zemský povrch ovlivňuje rychlost větru a v nejtěsnější blízkosti směrem k němu obecně rychlost větru klesá. Z tohoto důvodu je nutné provést korekci rychlosti větru z predikčního modelu na rychlost ve výšce náboje. Větrné elektrárny dosahují různých výšek a predikční modely predikují rychlosti větru převážně pro výšku 10 m nad povrchem země. Současné moderní větrné elektrárny dosahují výšky 90 až 100 m, off-shore elektrárny umístěné na mořské hladině i větších výšek. [1]

Při výpočtu predikované hodnoty elektrické energie větrné elektrárny se využívá závislost elektrického výstupního výkonu na rychlosti větru ve výšce náboje větrného motoru. [1]

Algoritmus výpočtu je následující:

- Vytvoření databáze predikované rychlosti větru s využitím matematických předpovědních modelů,
- korekce predikované rychlosti větru pro danou lokalitu a parametry konkrétní větrné elektrárny,
- citlivostní analýza korekčních faktorů,
- výpočet predikovaného výkonu v daném časovém horizontu,
- časová integrace predikovaného výkonu pro získání požadované hodnoty disponibilní energie z větrné elektrárny. [1]

Celková přesnost výpočtu predikované hodnoty elektrické energie z větrné elektrárny je závislá na přesnosti predikce rychlosti větru z předpovědního modelu a taktéž na korekci predikované rychlosti větru pro konkrétní podmínky větrné elektrárny. Citlivostní analýze korekčních faktorů by se měla věnovat značná pozornost. Nevětší vliv na přesnost korekce predikované rychlosti větru pro specifické podmínky větrné elektrárny má korekce na umístění sledované větrné elektrárny v predikčním čtverci, korekce vzhledem ke směru větru a korekce vzhledem k výšce náboje. [1]

Vzorec pro výškovou korekci lze vyjádřit vztahem:

$$v = v_0 \cdot \left(\frac{H}{H_0}\right)^a \quad (\text{m}\cdot\text{s}^{-1}) \quad (3.1)$$

kde: v je průměrná rychlost větru ve výšce H nad zemským povrchem ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
 v_0 je rychlost větru v referenční výšce H_0 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

H je výška, ve které je rychlost proudění vzduchu počítána (m)

H_0 je referenční výška ve které je rychlost proudění větru známa (m)

obvykle se uvažuje $H_0 = 10$ m

a je exponent korekčního vztahu, který závisí na drsnosti a profilu povrchu

obvyklá hodnota $a = 0,25$ [24]

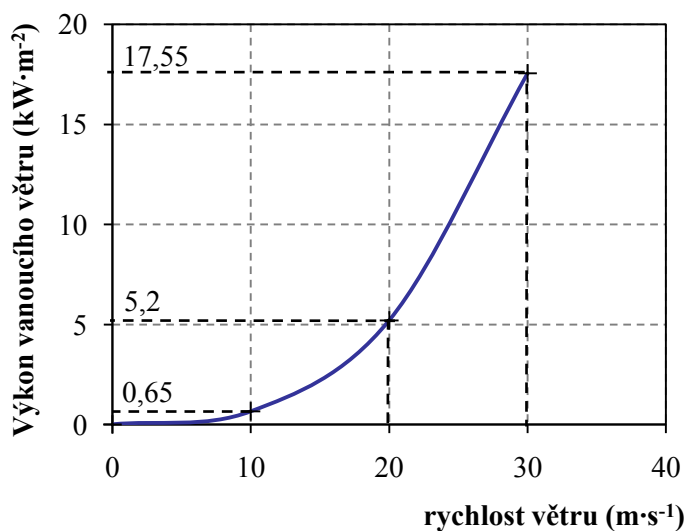
Tab. 3.1 Závislost exponentu na druhu povrchu [24]

Druh povrchu	a
hladký povrch, vodní hladina, písek	0,14
nízká travnatá vegetace	0,16
vysoká tráva, nízké obilné porosty	0,18
vysoké plodiny, nízké lesní porosty	0,21
lesy	0,28
vesnice a malá města	0,48

3.1.1 Specifická energie větru

Hustota energie větru, tedy výkon získaný stoprocentním využitím kinetické energie větru proudícího jednotkovou plochou kolmou na směr proudění, stoupá se třetí mocninou rychlosti větru.

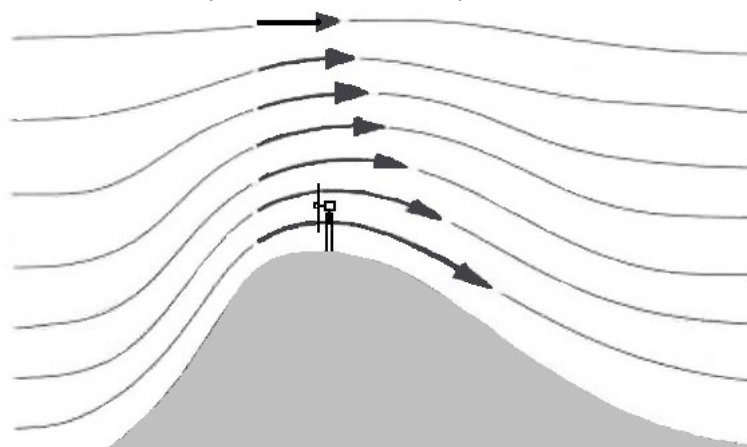
[28]



Obr. 3.3 Výkon pohybujícího se větru vztahovaný na plochu 1 m² [25]

Znát přesnou rychlost větru je velice důležité, neboť při dvojnásobku rychlosti větru jako například ze 4 m·s⁻¹ na 8 m·s⁻¹ vzroste jeho energie osmkrát. Je evidentní, že i malá odlišnost v rychlosti větru se značně projeví na množství získané elektrické energie.

Za normálních podmínek roste rychlost větru s výškou, ale u kopců nebo horských hřebenů je rychlost větru těsně nad vrcholem vyšší, než ve větších výškách.



Obr. 3.4 Urychlení větru na kopci [25]

3.2 Korekce rychlosti a směru větru pro danou VTE v důsledku umístění sledované větrné elektrárny v daném čtverci

Při predikci rychlosti a směru větru jsou přijata některá zjednodušení, jako už jmenované predikce pro jednotlivé kvazi čtverce, ve kterých je pro zjednodušení predikovaná rychlost a směr větru konstantní. Potřeba je provést korekci pro výslednou predikovanou rychlost a směr větru vzhledem k tomu, kde je sledovaná větrná elektrárna umístěna v predikčním čtverci. Pokud je větrná elektrárna umístěna v blízkosti hranice dvou predikčních čtverců, je třeba brát v úvahu i hodnoty, které jsou predikovány pro vedlejší predikční čtverec. Při predikci je třeba vycházet i ze znalosti konkrétních lokálních geomorfologických a meteorologických podmínek, jelikož mezi dvěma sousedními čtverci existuje určité pásmo necitlivosti. [1]

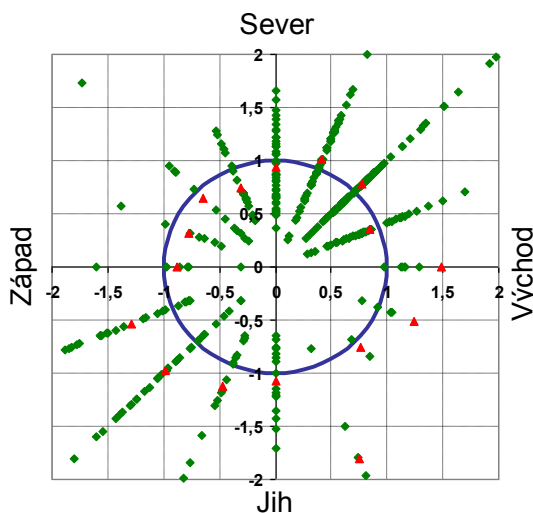
3.3 Korekce rychlosti větru vzhledem ke směru větru

Krajina v okolí větrné elektrárny je ve většině případů různě členitá. Vítr vanoucí směrem k větrné elektrárně musí z odlišných směrů překonávat různé překážky a bude se zpomalovat o jiné povrchy. [1]

Pro směr větru v dané výšce je v ideálním případě třeba porovnat data z anemometru, přístroje pro měření rychlosti proudění anebo rychlosti a směru proudění větru, umístěném na gondole. Body jsou pak vykresleny v polárních osách, poměr měřené a předpokládané rychlosti větru. Vzdálenost od nulového bodu je dána poměrem předpokládané hodnoty rychlosti větru a úhel je dán předpokládaným směrem větru. [24]

Obr. 3.5 zobrazuje graf koeficientů, sloužících ke korekci rychlosti větru podle směru. Zelenou barvou jsou znázorněny změřené body korekčních koeficientů (poměr predikované a skutečné rychlosti větru podle predikovaného směru). Červené body znázorňují aritmetický průměr jednotlivých hodnot korekčních koeficientů. Jednotky na osách jsou hodnoty korekčního koeficientu.

[1]



Obr. 3.5 Korekce rychlosti vzhledem ke směru větru [1]

Dále můžeme korekci na směr větru vyjádřit jako funkci $\beta: R \rightarrow R$, která každému azimutu ω , kde $\omega \in (0; 2\pi)$, přiřazuje jistý korekční koeficient. Vzorec pro korekci rychlosti větru můžeme tedy vyjádřit jako [1]:

$$v = v_0 \cdot \beta(\omega) \cdot \left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (3.2)$$

Pro náležitou funkci korekce je potřeba určit exponent korekčního vztahu α a funkci $\beta(\omega)$. Jestliže máme danou posloupnost predikovaných hodnot rychlostí větru a azimutů, a k nim odpovídající naměřené skutečné hodnoty rychlosti větru (směr větru je obvykle predikován spolehlivě a není nutné jej proto korigovat), můžeme se pokusit určit hodnotu exponentu α a funkci $\beta(\omega)$. [1]

Obtížnější však zůstává určení funkce $\beta(\omega)$. K praktickým účelům postačuje, pokud budeme funkci $\beta(\omega)$ nějakým způsobem aproximovat. V predikčním modelu, který je použit, rozdělujeme plný úhel na 16 částí a azimut ω je uniformně kvantován s krokem $\frac{2\pi}{16}$, proto můžeme azimut psát jako celé číslo z množiny $\{1, 2, \dots, 16\}$. [1]

Funkce $\beta(\omega)$ pak bude nabývat 16-ti diskrétních hodnot [1]:

$$\beta(\omega) = \begin{cases} \beta_1 & \text{pro } \omega = 1 \\ \vdots & \vdots \\ \beta_{16} & \text{pro } \omega = 16 \end{cases} \quad (3.3)$$

Vztah (3.2) se dá rozepsat uplatněním této aproximace jako 16 rovnic, které se budou lišit hodnotou činitele $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{16}$. [1]

3.3.1 Řešení pomocí soustavy rovnic

Za předpokladu, že máme k dispozici celkem k hodnot predikovaných rychlostí větru $v_{0,1}, \dots, v_{0,k}$, azimutů $\omega_1, \dots, \omega_k$ a k tomu odpovídající skutečné hodnoty rychlosti větru v_1, \dots, v_k , tak jsme schopni tyto hodnoty dosadit do rovnice (3.2) tak, že při vhodně zvolených hodnotách

koeficientů se predikovaná rychlost s korekcí rovná rychlosti naměřené. Dostaneme pak soustavu k rovnic o 17 neznámých. [1]

Logaritmováním obou stran rovnice (3.2) dostáváme [1]:

$$\log v = \log v_0 + \log \beta + \alpha \log \left(\frac{H}{H_0} \right), \quad (3.4)$$

a odtud

$$\alpha \log \left(\frac{H}{H_0} \right) + \log \beta = \log \left(\frac{v}{v_0} \right). \quad (3.5)$$

Rozepsáním rovnice (3.5) pro jednotlivá měření pak dostaneme soustavu rovnic [1]:

$$\begin{pmatrix} \log \left(\frac{H}{H_0} \right) & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \log \left(\frac{H}{H_0} \right) & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \log \left(\frac{H}{H_0} \right) & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha \\ \log \beta_1 \\ \vdots \\ \log \beta_{16} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \log \frac{v_1}{v_{0,1}} \\ \log \frac{v_2}{v_{0,2}} \\ \vdots \\ \log \frac{v_k}{v_{0,k}} \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

Tato soustava rovnic se následně řeší pomocí metody nejmenších čtverců.

3.3.2 Řešení pomocí vícedimenzionální optimalizace

Úlohu nalezení hodnot koeficientů $\alpha, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{16}$ lze taktéž formulovat jako problém nalezení minima funkce těchto 17 proměnných. Jedná se tedy o problém hledání minima v 17dimenzionálním prostoru. V tomhle případě se hledá minimum chybové funkce, kterou je popsán rozdíl mezi skutečnou rychlostí větru a predikovanou hodnotou rychlosti větru [1]:

$$err(\alpha, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{16}) = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left[v_i - v_{0,i} \cdot \beta(\omega) \cdot \left(\frac{H}{H_0} \right)^\alpha \right]^2} \quad (3.7)$$

Pro výpočet byla použita Powellova metoda sdružených gradientů [26]. Hlavní předností této metody je fakt, že oproti jiným gradientním metodám optimalizace se nevyžaduje výpočet gradientu minimalizované funkce. [1]

3.3.3 Hodnocení výsledků

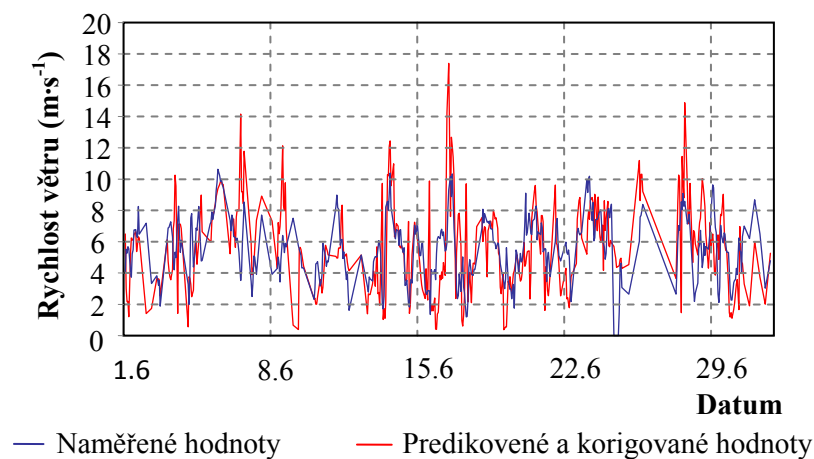
Porovnání vývoje skutečné rychlosti větru s predikovanou rychlostí větru, za použití korekcí podle vztahu (3.2), je vyobrazeno v grafu na obr. 3.6, a to pro výpočet metodou nejmenších čtverců, a na následujícím grafu je použita Powellova metoda sdružených gradientů obr. 3.7. K porovnání byla použita data za měsíc červen. Na první pohled oba dva grafy působí velmi podobně, ale pro věcné zhodnocení je nezbytné brát na vědomí i vypočtení hodnoty koeficientu. Konkrétní výsledky hodnot jednotlivých koeficientů získaných oběma metodami jsou v tab. 3.2. [1]

Pokud se podíváme na hodnotu koeficientu α , získanou pomocí metody nejmenších čtverců, je jasné, že vypočtená hodnota se neshoduje s očekávanou hodnotou uváděnou v literatuře. V tomto smyslu výsledek z Powellovy metody, pro koeficient α , je už mnohem objektivnější a obdobně jsou na tom i hodnoty $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{16}$. Při použití optimalizační metody je dosaženo lepších výsledků. [1]

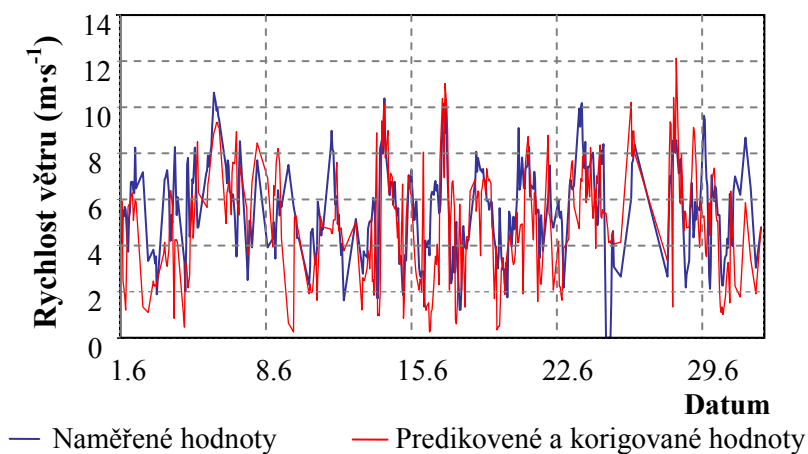
Tab. 3.2 Vypočtené hodnoty koeficientů [1]

Koeficient	Metoda nejmenších čtverců	Powellova metoda
α	-0,318	0,194
β_1	3,588	1,206
β_2	3,051	0,962
β_3	2,524	0,825
β_4	3,602	0,785
β_5	5,651	2,002
β_6	7,962	2,807
β_7	6,436	2,054
β_8	6,523	1,524
β_9	5,365	1,104
β_{10}	3,731	1,120
β_{11}	3,449	1,086
β_{12}	3,402	1,093
β_{13}	3,312	1,040
β_{14}	4,002	1,125
β_{15}	5,158	1,457
β_{16}	3,247	1,116

Celková chyba mezi skutečnou rychlostí větru a predikovanou rychlostí větru, za absence jakékoliv korekce, je 65,21 %. Pro výpočet chyby byl použit vztah (3.7). Při korekci rychlosti větru pomocí koeficientů získaných metodou nejmenších čtverců dosáhneme chyby 54,14 %. U korekce s koeficienty získanými vícedimenzionální optimalizací je chyba 50,09 %. Proto je výhodnější a přesnější použití pro výpočet optimalizační metody. [1]



Obr. 3.6 Průběh skutečné rychlosti větru a predikované rychlosti větru s korekčními parametry vypočtenými pomocí metody nejmenších čtverců [1]



Obr. 3.7 Průběh skutečné rychlosti větru a predikované rychlosti větru s korekčními parametry vypočtenými pomocí Powellovy metody sdružených gradientů [1]

3.4 Korekce rychlosti větru vzhledem k aktuální teplotě a tlaku

Výpočet výkonové křivky větrné elektrárny je tvořen pro rychlost větru, který představuje vzduch o normální teplotě a normálním tlaku, vzduch má pak „normální“ hustotu. Ale při různé teplotě a různém tlaku se mění hustota vzduchu. Korekci rychlosti větru vzhledem k aktuální teplotě a tlaku tak provádíme z důvodu měnící se kinetické energie vzduchu, který nám pohání rotorové listy větrné elektrárny. [1]

Větrnou energii můžeme vypočítat pomocí rovnice:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot v^3 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (3.8)$$

kde: P_v je energie vanoucího větru ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
 ρ je hustota vzduchu ($1,205 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ za normálních povětrnostních podmínek)
 v je rychlost proudění vzduchu ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) [24]

Pro hustotu vzduchu platí:

$$\rho = \frac{p}{r \cdot T} \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (3.9)$$

kde: ρ je hustota vzduchu ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
 p je atmosférický tlak (Pa)
 T je termodynamická teplota vzduchu (K)
 r je plynová konstanta, plynová konstanta pro vzduch je zhruba $287 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [24]

Termodynamickou teplotu vzduchu spočítáme z naměřených teplot:

$$T = 273,15 + t_0 \quad (\text{K}) \quad (3.10)$$

kde: T je termodynamická teplota vzduchu (K)
 t_0 je naměřená teplota vzduchu ($^{\circ}\text{C}$) [24]

Pro výkonovou křivku větrné elektrárny za normálních atmosférických podmínek platí:

$$P = f(v) \quad (\text{W}) \quad (3.11)$$

kde: P je elektrický výkon větrné elektrárny (W)
 v je rychlosti proudění větru ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) [24]

Výpočet větrné energie v případě proměnlivého atmosférického tlaku p a teploty vzduchu t musíme přepočítat pomocí rovnice:

$$P_v = k(p, t_0) \cdot P \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (3.12)$$

funkce korekce $k(p, t_0)$ je:

$$k(p, t_0) = \frac{p}{\rho \cdot r \cdot (273,15 + t_0)} \quad (\text{m}^{-2}) \quad (3.13)$$

kde: P_v je energie vanoucího větru ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
 P je elektrický výkon větrné elektrárny (W)
 p je atmosférický tlak (Pa)
 ρ je hustota vzduchu ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
 r je plynová konstanta ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
 t_0 je naměřená teplota vzduchu ($^{\circ}\text{C}$) [24]

Kinetická energie větru se vypočítá podle vzorce:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (\text{J}) \quad (3.14)$$

kde: E_k je kinetická energie (J)
 m je hmotnost proudícího vzduchu (kg)
 v je rychlost proudění vzduchu ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Pro hmotnost m platí vztah:

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot s \quad (\text{kg}) \quad (3.15)$$

kde: ρ je hustota vzduchu ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
 V je objem (m^3)
 A je plocha, kterou daný objem protéká (m^2)
 s je dráha, kterou urazí pohybující se vzduch (m)

4. Verifikace predikčního modelu v rámci experimentálního měření

Predikční model byl ověřován v rámci experimentálního měření pro konkrétní podmínky větrné elektrárny se jmenovitým výkonem 2 MW a pro časový interval 72 hodin. Měření bylo provedeno v lokalitě Veselí. Měřicí část byla složena ze dvou systémů. První měřicí systém - pro měření meteorologických podmínek byl nainstalován na věži větrné elektrárny a druhý měřicí systém - pro měření toku elektrické energie v rozvodně analyzované větrné elektrárny. Současně se zahájením měření byla stažena data z meteorologického předpovědního modelu do databáze.

Při ověření predikčního modelu byl zvolen časový interval 72 hodin, pro tento časový interval byla k dispozici data z meteorologického a energetického měřicího systému. Jako první byly porovnány údaje z měřicího systému pro měření reálných meteorologických podmínek instalovaném na věži větrné elektrárny s výstupy z numerického předpovědního modelu počasí.

S přihlédnutím k tomu, že výstupy z numerického předpovědního modelu počasí byly korigovány na skutečný stav větrné elektrárny pomocí následujících korekcí [24]:

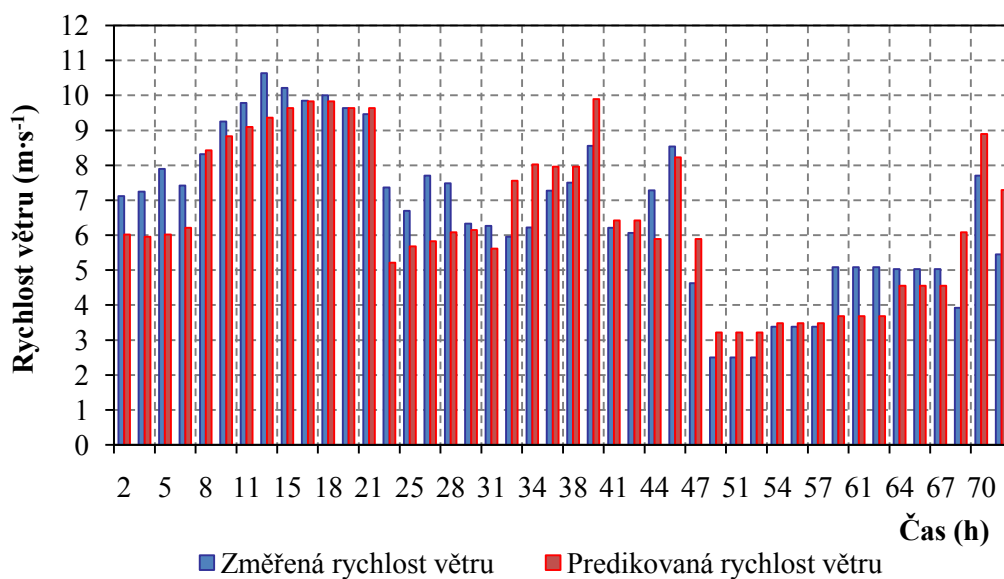
- Korekce rychlosti větru vzhledem ke směru větru,
- korekce rychlosti a směru větru pro danou VTE v důsledku umístění sledované VTE v daném čtverci,
- korekce rychlosti vzhledem k výšce náboje VTE,
- korekce rychlosti větru vzhledem k aktuální teplotě a tlaku vzduchu.

4.1 Ověření predikované rychlosti větru z numerického modelu počasí

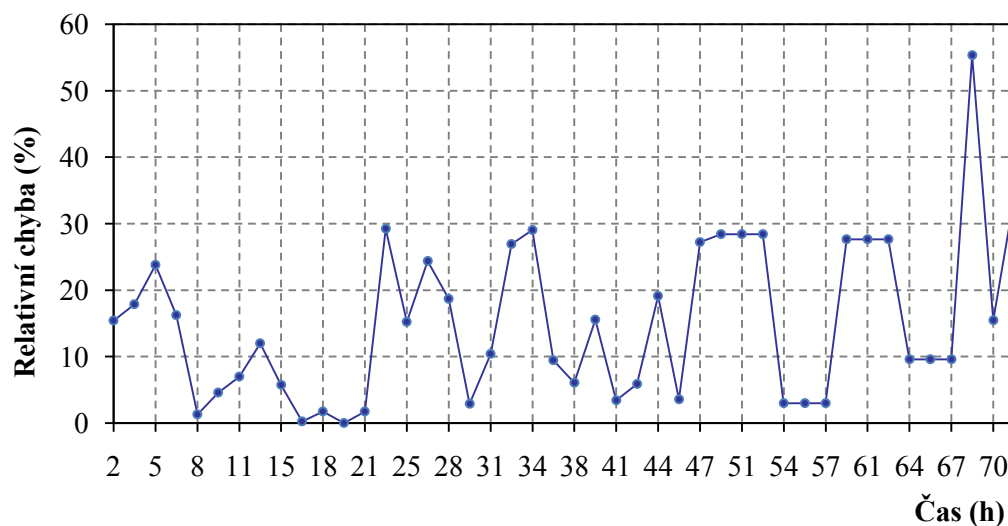
Srovnání údajů rychlosti větru, získané reálným měřením a predikcí meteorologického modelu, je uvedeno na obr. 4.1.

Pro snížení relativní chyby při hodnocení bylo třeba rychlosti větru rozdělit do intervalů. K relativně velké shodě dochází podle obr. 4.1 při rychlosti větru nad $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Vzhledem k tomu, že systém větrné elektrárny má maximální výstupní výkon v okamžiku, kdy rychlost větru je vyšší než $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, je zřejmé, že predikovaná energie bude v požadované přesnosti hodnocení. [24]

Tato skutečnost je potvrzena na grafickém znázornění výsledků v obr. 4.6. Výstupní výkon větrné elektrárny, získaný při experimentálním měření a za pomoci algoritmu z dat získaných predikčním modelem, je zobrazen na obr. 4.6. [24]



Obr. 4.1 Kontrola predikce rychlosti větru na 72 hodin



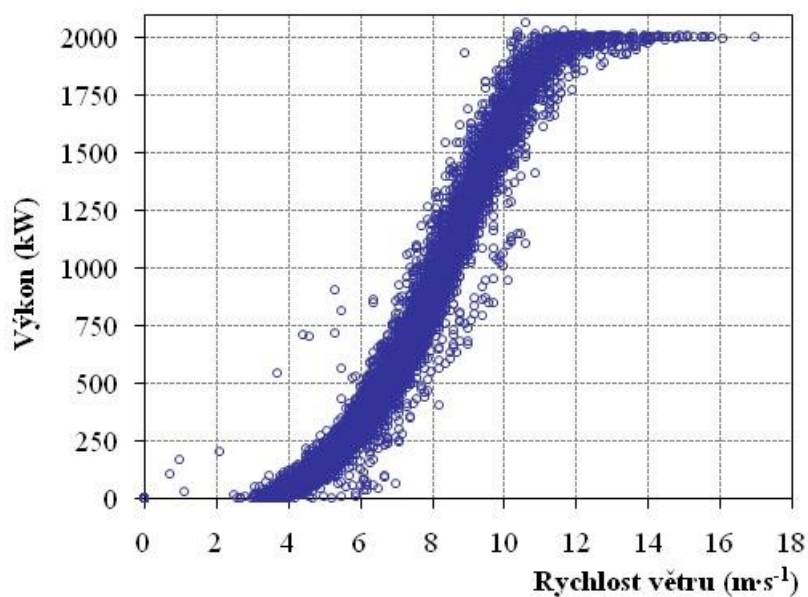
Obr. 4.2 Velikost relativní chyby pro predikovanou rychlost větru

Střední hodnota relativní chyby podle obr. 4.2 je 13,59 %.

4.2 Sestavení a ověření výkonové křivky sledované větrné elektrárny

Výkonová křivka byla sestavena za pomoci meteorologických údajů a databáze naměřených hodnot toku výkonu. Výkonová křivka větrné elektrárny se definuje jako závislost elektrického výkonu elektrárny pro danou rychlost větru. Na tvar výkonové křivky má vliv použitý generátor, systém řízení a větrná turbína. [24]

Na obr. 4.3 jsou graficky znázorněna naměřená data o závislosti výkonu na rychlosti větru.



Obr. 4.3 Výkonová křivka vykreslena pomocí jednotlivých bodů

Z technické dokumentace k dané větrné elektrárně byla sestavena výkonová křivka a k ní vypočítaný, dle vztahu (1.3), teoretický výkon. Výkon udaný výrobcem větrné elektrárny odpovídá skutečně změřenému, v rámci experimentálního měření. Výsledný graf je zobrazen na obr. 4.4.

Tab. 4.1 Porovnání výkonu VTE udaného výrobcem a získaného v rámci experimentálního měření

Rychlost větru ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Výkon udaný výrobcem (kW)	Teoretický výkon (kW)	Průměrný změřený výkon (kW)
0	0	0	0
1	0	1	0
2	0	12	0
3	0	40	6
3,5	15	63	12
4	70	95	38
5	180	185	138
6	350	320	321
7	510	508	558
8	780	758	890
9	1150	1080	1251
10	1500	1481	1603
11	1780	1971	1871
12	1920	2559	1957
13	2000	3253	1980
14	2000	4064	1994
15	2000	4998	2000
16	2000	6066	2000
17	2000	7276	2000
18	2000	8636	2000

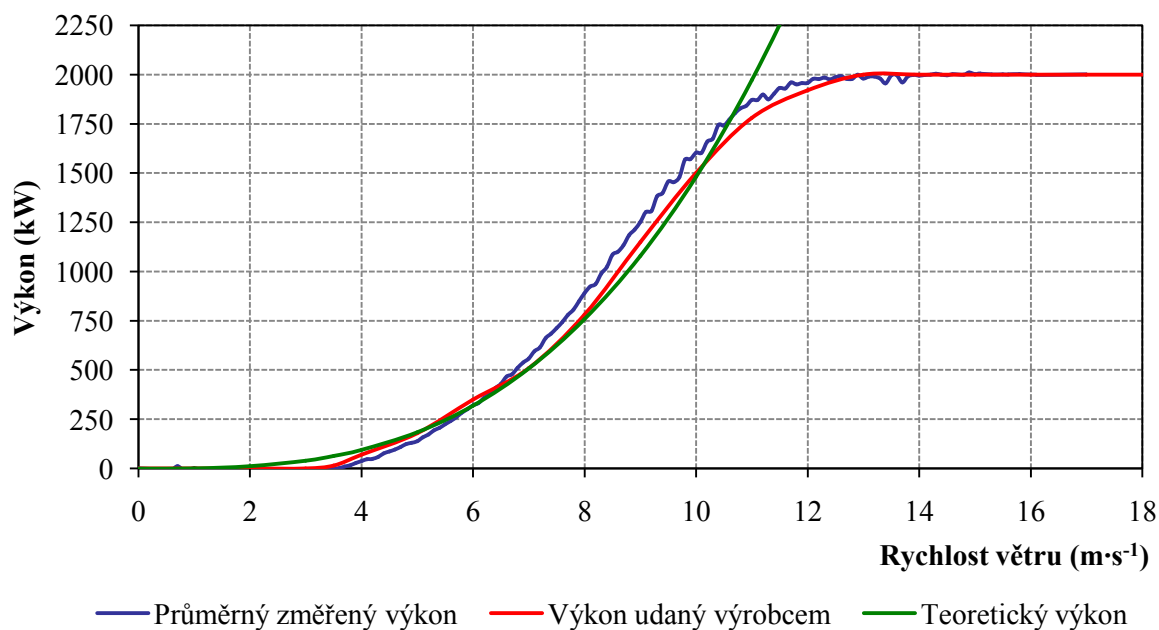
Teoretický výkon byl spočten pomocí vztahu (1.3), příklad výpočtu je pro rychlost větru $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$:

$$P_7 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot c_p \cdot S = \frac{1}{2} \cdot 1,2932 \cdot 7^3 \cdot 0,36 \cdot 6361,72 = 507\,934 \text{ W},$$

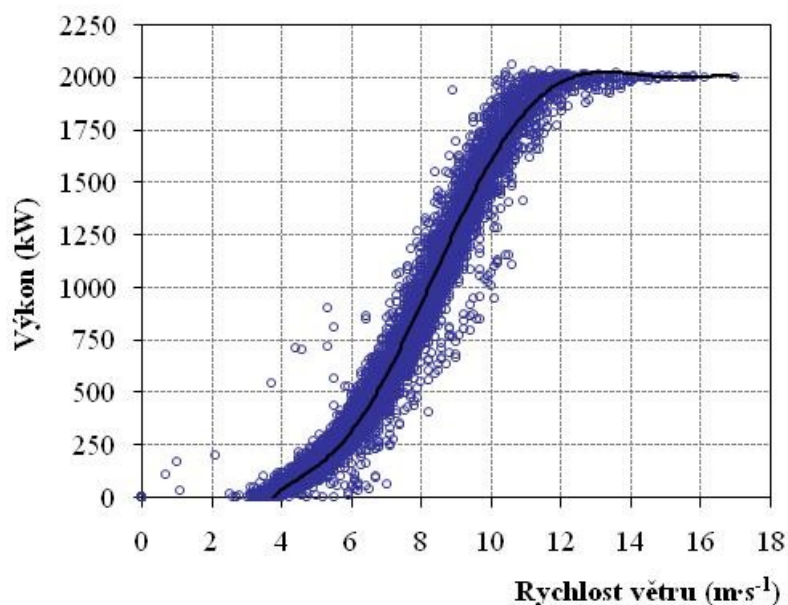
kde plocha rotoru s průměrem 90 metrů je:

$$S = \pi \cdot \frac{d^2}{4} = \pi \cdot \frac{90^2}{4} = 6\,361,72 \text{ m}^2.$$

Výkonový součinitel c_p se nepodařilo pro sledovanou větrnou elektrárnu vyhledat, pro výpočet byla použita hodnota $c_p = 0,36$ (–) obvykle používaná v literatuře. Moderní turbíny mají výkonový součinitel v rozmezí $0,35 < c_p < 0,45$ (–).



Obr. 4.4 Srovnání výkonu udaného výrobcem a výkonu získaného v rámci experimentálního měření



Obr. 4.5 Výkonová křivka větrné elektrárny (2 MW)

Po aproximaci trendu byla získána rovnice regrese:

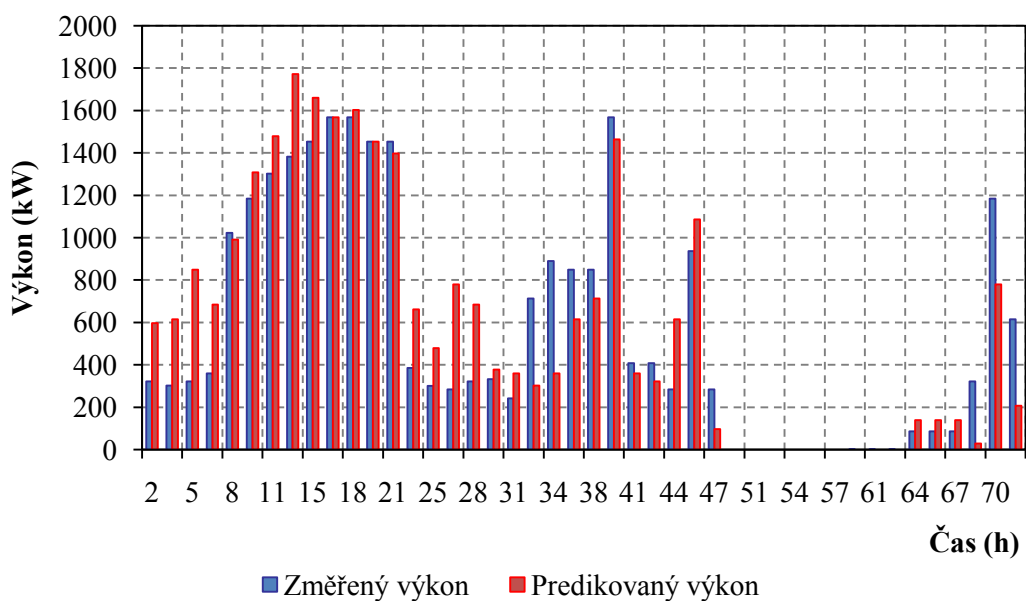
$$y = -0,012x^6 + 0,773x^5 - 19,5x^4 + 241,3x^3 - 1515x^2 + 4743x - 5879 \quad (4.1)$$

Hodnota spolehlivosti: $R^2 = 0,940$

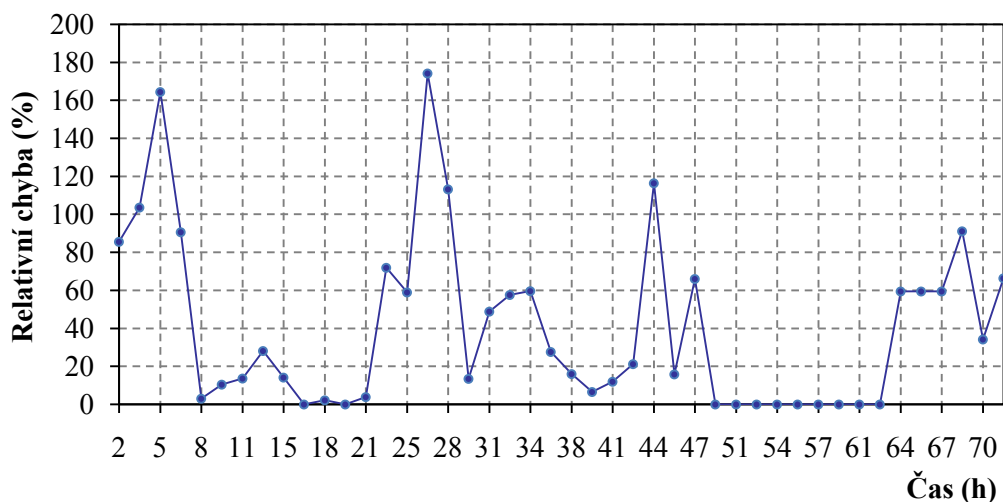
Rovnice (4.1) platí pro rychlost větru od $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, při které větrná elektrárna začne přeměňovat energii, až do rychlosti větru $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, kdy dosáhne jmenovitého výkonu 2 MW.

4.3 Ověření predikovaného výkonu

Na základě údajů o předpokládaném výkonu, získaném tímto způsobem, je možné vypočítat souhrnnou předpovídanou výrobu elektrické energie za jednotlivé dny nebo i delší časová období. Předpovídaná výroba elektrické energie VTE závisí na délce předpovědi a přesnosti dat z numerických predikčních modelů, s rostoucí délkou předpovědi však přesnost klesá. Hlavním důvodem pro odhad vyrobené elektrické energie z větrných elektráren je snaha určit množství požadovaných záložních zdrojů co nejpřesněji pro zachování správného chodu elektrizační soustavy v případě kolísání dodávek elektrické energie z obnovitelných zdrojů. V těchto případech jsou totiž dodávky elektrické energie z větrné elektrárny nahrazeny ze záložních zdrojů. Z tohoto důvodu určujeme perspektivu dodávek elektrické energie z větrných elektráren na dobu několika dnů (obvykle 72 hodin), pokud možno co nejpřesněji. Snahou je minimalizovat ekonomické náklady vynaložené na tyto mimořádné zálohy, jež většinou pokrývají tepelné elektrárny. [24]

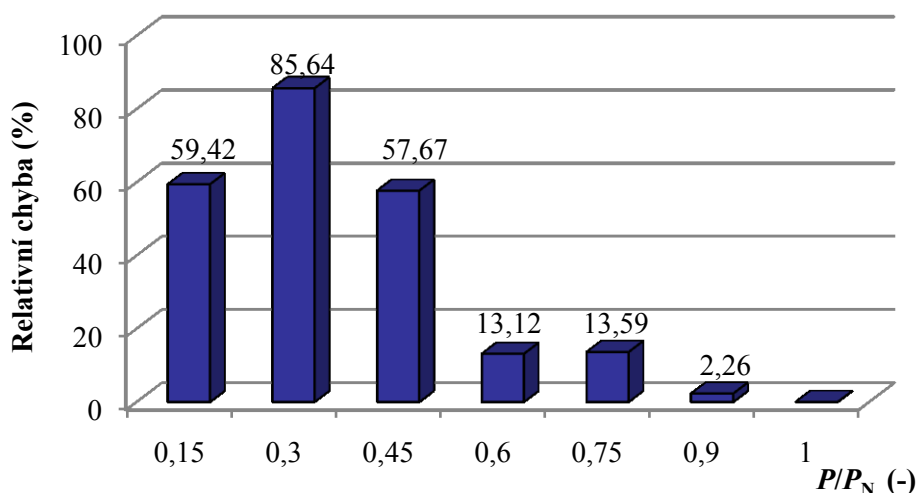


Obr. 4.6 Kontrola predikce výkonu na 72 hodin



Obr. 4.7 Velikost relativní chyby pro predikovaný výkon

Střední hodnota relativní chyby podle obr. 4.7 je 18,66 %.

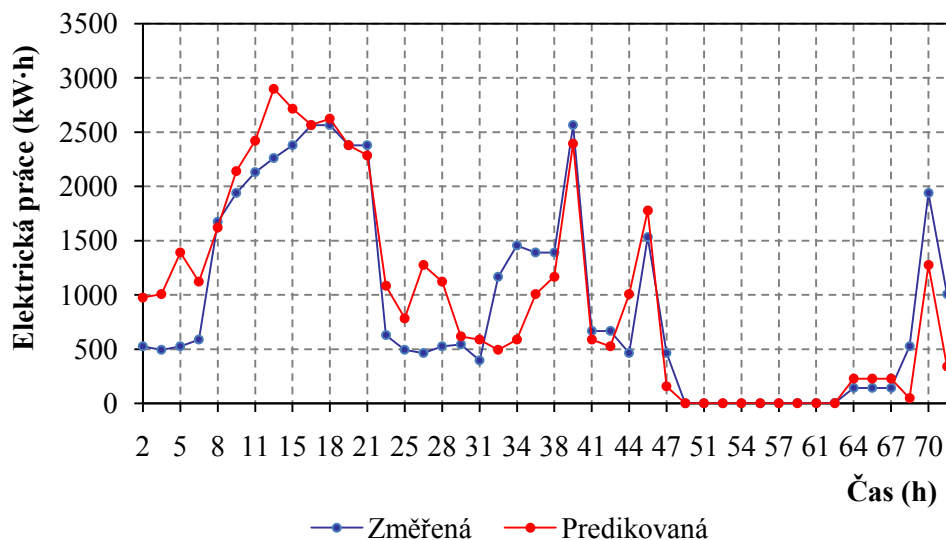


Obr. 4.8 Závislost chyby na dané četnosti výkonu

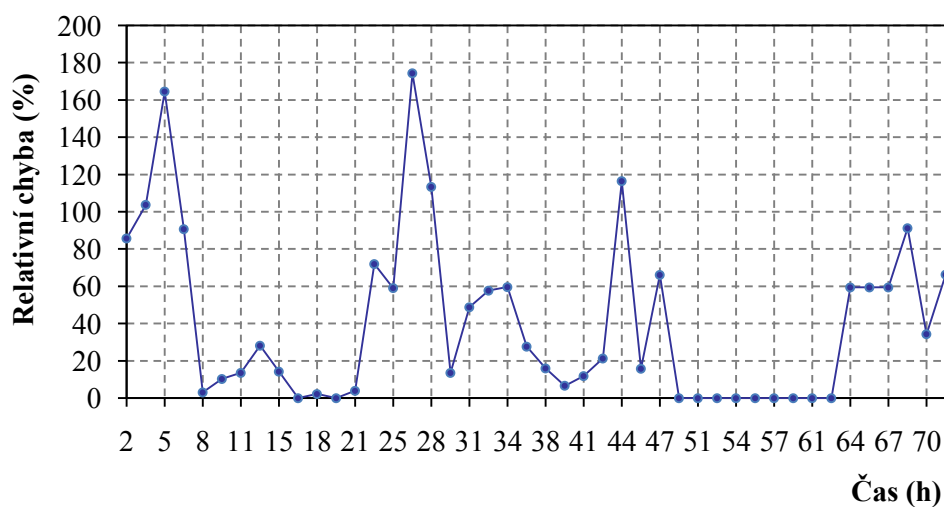
Podle obr. 4.8 bylo dosaženo vyšší přesnosti predikovaného výkonu, čím více se poměr P/P_N (kde P je změřený výkon a P_N je jmenovitý výkon 2 MW) blíží k jedné. Pro vyšší výkony (rychlosti větru) je predikce přesnější. Použitá data pochází z kontroly predikce výkonu na 72 hodin. Pro spolehlivé určení chyby by bylo potřeba provést dlouhodobější měření. V průběhu měřených 72 hodin nedosáhla větrná elektrárna svého jmenovitého výkonu (2 MW), jelikož maximální rychlost ve sledovaném období byla do $10,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Dle výkonové křivky na obr. 4.5 dosahuje daná větrná elektrárna jmenovitého výkonu od rychlosti větru $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Proto se i v intervalu (0,9 až 1) P/P_N nevyskytuje žádná hodnota.

4.4 Přeměněná energie za sledované období

Na základě informací od operátora trhu pro dispečerské řízení provozu zařízení přenosové soustavy a systémových zdrojů potřebuje dispečer znát aktuální a předpovídanou přeměněnou energii. Pomocí ní je pak schopen zajistit rovnováhu mezi výrobou a spotřebou elektrické energie v každém okamžiku.



Obr. 4.9 Přeměněná energie za měřených 72 hodin



Obr. 4.10 Velikost relativní chyby pro predikovanou energii

Střední hodnota relativní chyby podle obr. 4.10 je 18,66 %.

Elektrická práce byla spočtena pomocí následujícího vzorce:

$$W = P \cdot t \quad (\text{kW} \cdot \text{h}) \quad (4.2)$$

kde: W je elektrická práce (kW·h)

P je elektrický výkon větrné elektrárny (kW)

t je čas (h)

Celkem bylo za měřených 72 hodin vyrobeno 41 127 kW·h a predikovaná hodnota činí 43 652 kW·h.

5. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo zpřesnění stávajícího predikčního modelu, jehož vývoj byl před několika lety zahájen na Katedře elektroenergetiky VŠB-TU Ostrava pro elektrizační soustavu České republiky.

Trend růstu žádostí o připojení větrných elektráren do distribučních sítí v České republice pokračuje, větrná energetika se ubírá neustále vpřed. Nový směr vývoje větrných elektráren míří k vyšším stožárům a větším průměrům rotorů. Z nalezené vhodné lokality na výstavbu větrné elektrárny chce investor vytěžit maximum energie, používá se menšího počtu větrných elektráren s vyššími stožáry a zvyšují se i výkony samotných elektráren. Počet vhodných lokalit na výstavbu větrných elektráren ubývá. Další navyšování instalovaného výkonu, po vyčerpání vhodných lokalit, bude v náhradě stávajících projektů novou technologií. Ovšem jednotlivé termíny realizace projektů větrných elektráren se posouvají. Tato zdržení vykazují skluz přibližně 3 roky, za které se ekonomika projektu od původního návrhu může značně lišit. Realizovat se podaří asi jeden z deseti projektů zamýšlené výstavby.

Nárůst instalovaného výkonu z větrných elektráren negativně ovlivňuje provoz celé elektrizační soustavy, dodávaný výkon do distribuční sítě má značnou variabilitu. Je proto nutné mít vybudovanou dostatečnou soustavu záložních zdrojů. Na záložní zdroje se kladou stále větší požadavky, avšak zároveň s tím se zlepšuje přesnost predikce elektrické energie a umožňuje tak uvolnit zdroje, které by jinak zůstaly blokovány jako rezervní výkon a tím snížit celou ekonomickou náročnost.

Celkový objem finančních prostředků na rezervaci podpůrných služeb činí cca 8,5 mld. Kč za rok. V konečném důsledku to zaplatí každý koncový spotřebitel elektrické energie. Tato částka roste s množstvím instalovaných a připojených obnovitelných zdrojů do elektrizační soustavy. Promocí predikce je snahou snížit celkový počet záložních zdrojů a tím i finanční prostředky.

Z meteorologických modelů se získají údaje o rychlosti a směru větru pro daný čas a predikční čtverec. Míra úspěšnosti předpovědi je závislá hlavně na výchozím stavu atmosféry a na možnosti matematicky přesně namodelovat všechny vlivy působící na další vývoj počasí. Jednotlivé numerické předpovědní modely počasí se liší zvláště ve velikosti predikčního čtverce, délce předpovědního období a času pravidelných aktualizací predikovaných dat. Numerické předpovědní modely patří k vůbec nejsložitějším počítačovým programům na světě. Měření rychlosti větru z meteorologických modelů nejsou primárně určena pro potřebu větrné energetiky, ale pro předpověď počasí. Z tohoto důvodu není jejich umístění zpravidla příliš optimální. Měření větru se provádí i na samotných strojevnách větrných elektráren, avšak slouží především pro regulaci provozu samotné elektrárny. S rostoucí délkou předpovědi však klesá přesnost získaných dat. Možnosti meteorologických modelů jsou omezeny složitostí reálných podmínek a výkonností výpočetní techniky. Pro přesnost predikce výroby elektrické energie je podstatným parametrem velikost predikčního čtverce daného meteorologického modelu. Meteorologické podmínky se považují v tomto predikčním čtverci za konstantní. Predikovaný směr a rychlosti větru jsou následně použity jako vstupní data pro predikční modely. Údaje o predikovaném směru a rychlosti větru se pro větrnou elektrárnu umístěnou v tomto predikčním čtverci přizpůsobují pomocí systému korekcí. Jednotlivé korekce mají různou obtížnost a vliv na výslednou přesnost předpovědi. Velký vliv má korekce vzhledem ke směru větru a korekce na umístění sledované větrné elektrárny v daném čtverci. Výpočet uvedených dvou korekcí patří k nejobtížnějším. Naopak, výpočet korekce rychlosti vzhledem k výšce náboje a korekce na aktuální teplotu a tlak je už snadný, nedopouštíme se u něj tak závažných chyb.

Celková přesnost výpočtu predikované hodnoty elektrické energie z větrné elektrárny je závislá na přesnosti predikce rychlosti větru z meteorologického modelu a taktéž na korekci predikované rychlosti větru pro konkrétní podmínky větrné elektrárny.

Mezi základní parametry, definující účinnost přeměny větrné energie na energii elektrickou, patří výkonová křivka konkrétní větrné elektrárny, udávající závislost elektrického výstupního výkonu elektrárny na rychlosti větru. Při výpočtu predikované hodnoty elektrické energie se tvoří databáze predikované rychlosti větru s využitím meteorologických modelů, následně se provádí korekce predikované rychlosti větru pro danou větrnou elektrárnu, citlivostní analýza korekčních faktorů, výpočet predikovaného výkonu v daném časovém období a jeho časová integrace pro získání požadované hodnoty disponibilní energie z větrné elektrárny.

Při sestavení výkonové křivky z naměřených hodnot byl ověřen i výkon udaný výrobcem větrné elektrárny, ten odpovídá skutečně změřenému.

Samotné ověřování predikčního modelu v rámci experimentálního měření bylo provedeno v lokalitě Veselí na větrné elektrárně se jmenovitým výkonem 2 MW a pro časový interval 72 hodin. Data získaná z numerického předpovědního modelu počasí byla korigována pomocí základních čtyř korekcí (korekce rychlosti větru vzhledem ke směru větru, korekce rychlosti a směru větru v důsledku umístění v daném predikčním čtverci, korekce rychlosti vzhledem k výšce náboje větrné elektrárny a korekce rychlosti větru vzhledem k aktuální teplotě a tlaku vzduchu). Jako první byly porovnány údaje z měřicího systému pro měření reálných meteorologických podmínek, nainstalovaném na věži větrné elektrárny, s výstupy z numerického předpovědního modelu počasí. V rámci snížení relativní chyby při hodnocení bylo třeba rychlosti větru rozdělit do intervalů. K relativně velké shodě dochází při rychlosti větru nad $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Střední hodnota relativní chyby pro predikované rychlosti větru je 13,59 %. Vzhledem k tomu, že systém větrné elektrárny má maximální výstupní výkon v okamžiku, kdy rychlost větru je vyšší než $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, je zřejmé, že predikovaná energie bude v požadované přesnosti hodnocení. Střední hodnota relativní chyby pro predikovaný výkon činí 18,66 %. Predikovaný výkon je přesnější tím více, čím se změřený výkon blíží k jmenovitému výkonu. Pro vyšší rychlosti větru je predikce přesnější.

Na základě údajů o předpokládaném výkonu byla vypočítána elektrická energie. Celkem bylo za měřených 72 hodin vyrobeno 41 127 kW·h, predikovaná hodnota činí 43 652 kW·h, relativní chyba je 6,14 %. Hlavním důvodem pro odhad vyrobené elektrické energie z větrných elektráren je snaha určit množství požadovaných záložních zdrojů pro zachování správného chodu elektrizační soustavy v případě kolísání dodávek elektrické energie z větrných elektráren.

Akceschopnost energetické soustavy, jako zapnutí nebo vypnutí záložních zdrojů energie, je omezena určitým časem, a proto je třeba znát budoucí výrobu s dostatečným předstihem. Odhad budoucí výroby energie v horizontu desítek hodin dopředu je také potřebný při obchodování s energií. Při nečekaném výpadu energie je třeba okamžitě provést nákup dostupné energie samozřejmě za zvýšenou cenu. Při absenci kvalitní předpovědi výroby elektrické energie větrnými elektrárnami není možné její efektivní využití.

Je třeba vybudovat predikční systém (predikční centrum) očekávané výroby z vybraných obnovitelných zdrojů elektrické energie podle předpovědi a vývoje počasí. Systém by měl být jednotný pro celou Českou republiku s přímou vazbou na útvary přípravy provozu a dispečinky provozovatelů sítí přenosové a distribuční soustavy. Důvěryhodné informace o předpovědi nasazení výroby z obnovitelných zdrojů elektrické energie musí být aktuálně a operativně příslušným útvarům řízení přenosové a distribuční soustavy předávány tak, aby mohly být zohledněny jak v přípravě provozu, tak v operativním řízení přenosové a distribuční soustavy.

Seznam použité literatury

- [1] MIŠÁK, Stanislav; PROKOP, Lukáš. Prediction System for Energy Production from WPP. In Proceedings of the 11th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2010. Brno: VUT Brno. 2010. ISBN 978-80-214-4094-4.
- [2] VAVŘIŇÁK, Petr. *Užití elektrické energie* [online]. [s.l.], 2008. 130 s. Studijní materiály. Střední škola elektrotechnická, Ostrava, Na Jízdárně 30. Dostupné z WWW: <http://www.nastavba-ne.unas.cz/Uziti/ucebni_texty/Uziti%20elektricke%20energie2.pdf>.
- [3] RYVOLOVÁ, Ivana. *Ekonomie větrné energetiky v podmínkách České republiky* [online]. Praha, 2010. 117 s. Dizertační práce. Vysoká škola ekonomická v Praze. Dostupné z WWW: <http://kie.vse.cz/wp-content/uploads/wp_ryvolova.pdf>. <<http://www.stop-vetnikum.webz.cz/download/gacr.pdf>>.
- [4] Česká společnost pro větrnou energii. ČSVE [online]. 2010 [cit. 2010-11-12]. Velikost větrné elektrárny a její vývoj. Dostupné z WWW: <<http://www.csve.cz/cz/clanky/velikost-vetrne-elektrarny-a-jeji-vyvoj/110>>.
- [5] *Weather* [online]. 2003 [cit. 2010-10-12]. UNIFIED MODEL FOR POLAND AREA. Dostupné z WWW: <<http://wind.server.pl/pogoda/weather.icm.edu.pl/pages/model.html>>.
- [6] MIŠÁK, Stanislav; PROKOP, Lukáš; KREJČÍ, Petr; TADEUSZ, Sikora. Provoz větrných elektráren s měniči frekvence. *ELEKTRO* [online]. 2010, 10, [cit. 2010-10-13]. Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=37884>.
- [7] MIŠÁK, Stanislav. Napájení venkovního osvětlení z hybridních systémů obnovitelných zdrojů. *Kurz osvětlovací techniky* [online]. 2009, XXVII, [cit. 2010-11-15]. Dostupný z WWW: <http://www.csorsostrava.cz/Zelena_energie/Prispevek_kurz_osvetlovaci_techiky.pdf>.
- [8] Česká společnost pro větrnou energii. ČSVE [online]. 2010 [cit. 2010-11-4]. Větrná mapa. Dostupné z WWW: <<http://www.csve.cz/cz/clanky/vetrna-mapa/35>>.
- [9] Energetický regulační úřad [online]. 2011 [cit. 2011-02-27]. ERU. Dostupné z WWW: <<http://www.eru.cz/>>.
- [10] Česká společnost pro větrnou energii. ČSVE [online]. 2011 [cit. 2011-02-22]. Aktuální instalace. Dostupné z WWW: <<http://www.csve.cz/clanky/aktualni-instalace-vte-cr/120>>.
- [11] Česká společnost pro větrnou energii. ČSVE [online]. 2011 [cit. 2011-01-12]. Statistika. Dostupné z WWW: <<http://www.csve.cz/cz/clanky/statistika/281>>.

- [12] Česká společnost pro větrnou energii. *ČSVE* [online]. 2011 [cit. 2011-01-05]. Vývoj výkupních cen větrné energie a ostatních obnovitelných zdrojů. Dostupné z WWW: <<http://www.csve.cz/clanky/graf-vyvoje-vykupnich-cen/278>>.
- [13] ŠÁLEK, Milan. *Předpověď počasí* [online]. [s.l.], 2003. 19 s. Přednáška. Masarykova univerzita. Dostupné z WWW: <<http://geogr.muni.cz/archiv/vyuka/MeteoKlima/PredpovedPocasi.pdf>>.
- [14] ČSRES - České sdružení regulovaných elektroenergetických společností. Připojování OZE do ES ČR . [online]. 2010 Únor [cit. 2011-02-03]. Dostupné z WWW: <http://www.csres.cz/Aktualne/TK20100310/OZE_public_CSRES.pdf>.
- [15] Vašíček, J. Střednědobá předpověď a ansámblové předpovědi z centra ECMWF. *Meteorologické zprávy* [online]. 2003, 56, 4, [cit. 2010-11-24]. Dostupný z WWW: <<http://old.chmi.cz/meteo/olm/Archiv/Ansambly.htm>>.
- [16] *HIRLAM* [online]. 2010 [cit. 2010-12-2]. Welcome to HIRLAM. Dostupné z WWW: <http://hirlam.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=52&Itemid=130>.
- [17] *HIRLAM* [online]. 2010 [cit. 2010-10-20]. Synoptic scale model HIRLAM. Dostupné z WWW: <http://hirlam.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=48&Itemid=101>.
- [18] *METEO DAT* [online]. 2007 [cit. 2010-11-08]. Model GFS. Dostupné z WWW: <<http://www.meteodat.cz/gfs.php>>.
- [19] *Ústav informatiky AV ČR* [online]. 2007 [cit. 2010-12-8]. MEDARD. Dostupné z WWW: <<http://www.medard-online.cz/index.php>>.
- [20] *In-pocasi* [online]. 2010 [cit. 2010-11-25]. NMM 3. Dostupné z WWW: <<http://www.in-pocasi.cz/predpoved-pocasi/napoveda.php>>.
- [21] *Windguru* [online]. 2010 [cit. 2010-12-02]. Numerické modely používané na Windguru . Dostupné z WWW: <http://www.windguru.cz/cz/help_index.php?sec=models>.
- [22] HONSOVÁ, Dagmar. *Příroda* [online]. 2006-11-15 [cit. 2010-10-20]. Předpověď počasí - Meteorologické modely. Dostupné z WWW: <<http://www.priroda.cz/lexikon.php?detail=771>>.
- [23] *CHMI* [online]. 2009 [cit. 2010-12-17]. Model ALADIN. Dostupné z WWW: <<http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ov/aladin/index.html>>.
- [24] MIŠÁK, Stanislav; PROKOP, Lukas; SIKORA, Tadeusz; DAŚAL, Kazimierz; POPLAWSKI, Tomasz; RUSEK, Beata: Wind Power Plant Production Prediction Using Various Models. In RUSEK, Stanislav, GONO, Radomir (ed.). 10th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2009. 2009, ISBN 978-80-248-1947-1, p. 152-157.

- [25] Využití obnovitelných zdrojů energie pro napájení svítidel veřejného osvětlení : „Zelená energie“ Skupiny ČEZ . In *Metodická příručka* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2010 [cit. 2011-01-18]. Dostupné z WWW: <http://www.csorsostrava.cz/Zelena_energie/Metodicka_prirucka.pdf>.
- [26] POWELL, M. J. D. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives. *Computer Journal*. 1964, 7, s. 152–162.
- [27] *Meteocentrum* [online]. 2010 [cit. 2011-02-10]. Encyklopedie meteorologie a klimatologie. Dostupné z WWW: <<http://www.meteocentrum.cz/encyklopedie/vitr.php>>.
- [28] HANSLIAN, David. Klimatický potenciál větrné energetiky. *Veronica - sborník příspěvků z odborného semináře "Větrné elektrárny v Jihomoravském kraji"* [online]. 2007-07-18, 7, [cit. 2010-03-03]. Dostupný z WWW: <<http://www.dejmalka.cz/htm/content/kpve.pdf>>.
- [29] Větrná růžice. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 2006-07-21, last modified on 2010-03-12 [cit. 2011-03-12]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/V%C4%9Btrn%C3%A1_r%C5%AF%C5%BEice>.
- [30] ŠTEKL, Josef. Časová variabilita rychlosti větru a předpověď výroby větrnými elektrárnami. In *Konference ČK CIRED 2008* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2008 [cit. 2011-02-03]. Dostupné z WWW: <http://litovany.ic.cz/index_soubory/down/s4_01_08.pdf>.
- [31] ČSVE [online]. 2010 [cit. 2011-01-08]. Přínosy větrné energetiky. Dostupné z WWW: <<http://www.csve.cz/cz/clanky/prinosy-vetrne-energetiky/191>>.
- [32] MIŠÁK, Stanislav; PROKOP, Lukáš; DVORSKÝ, Jiří. Optimizing the Mathematical Model for Prediction of Energy Production in Wind Power Plants. *PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review)*. 2010, 1, s. 91-95. ISSN 0033-2097.
- [33] ČSVE [online]. 2010 [cit. 2011-03-06]. Větrné elektrárny ve světě. Dostupné z WWW: <<http://www.csve.cz/clanky/vetrne-elektrarny-ve-svete/283>>.
- [34] JANOUŠEK, Martin. *CHMI* [online]. 2006-08-28 [cit. 2011-03-07]. Hlavní rysy modelu ALADIN. Dostupné z WWW: <<http://old.chmi.cz/meteo/ov/aladin/aboutaladin/hlavnirysy.html>>.
- [35] ORSÁGOVÁ, Jaroslava; PTÁČEK, Jiří; MODLITBA, Petr; MALÝ, Jiří. Potenciál výstavby VTE v ČR a možnosti elektrických sítí pro jejich připojení - část 1. In *Konference ČK CIRED 2009* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2009 [cit. 2011-03-10]. Dostupné z WWW: <http://www.litovany.ic.cz/index_soubory/down/s4_01_09.pdf>.
- [36] MALÝ, Jiří; PTÁČEK, Jiří; MODLITBA, Petr. Potenciál výstavby VTE v ČR a možnosti elektrických sítí pro jejich připojení - část 2. In *Konference ČK CIRED 2009* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2009 [cit. 2011-03-14]. Dostupné z WWW: <http://www.litovany.ic.cz/index_soubory/down/s4_02_09.pdf>.

Seznam tabulek

Tab. 1.1	Regulované ceny za držení záloh	5
Tab. 1.2	Regulované ceny za čerpání záloh	6
Tab. 1.3	Navýšení držení výkonové rezervy z důvodu VTE.....	6
Tab. 1.4	Navýšení nákladů za držení výkonové rezervy z důvodu VTE	7
Tab. 1.5	Roční navýšení čerpání energie dodávané ze záloh z důvodu VTE.....	7
Tab. 1.6	Náklady na čerpání jednotlivých záloh z důvodu VTE.....	7
Tab. 1.7	Instalovaný výkon VTE v ČR	12
Tab. 1.8	Seznam větrných elektráren v ČR.....	15
Tab. 1.9	Vyrobené elektrická energie z VTE v jednotlivých měsících	17
Tab. 1.10	Vyrobená el. energie z VTE v ČR	17
Tab. 1.11	Vývoj výkupních cen	18
Tab. 2.1	Beaufortova stupnice rychlosti větru.....	20
Tab. 3.1	Závislost exponentu na druhu povrchu	32
Tab. 3.2	Vypočtené hodnoty koeficientů	36
Tab. 4.1	Porovnání výkonu VTE udaného výrobcem a získaného v rámci experimentálního měření ..	42

Seznam obrázků

Obr. 1.1	Vývoj nákladů na nákup podpůrných služeb při uvažovaném rozvoji VTE z roku 2009.....	6
Obr. 1.2	Závislost průměru rotoru na jmenovitém výkonu VTE	10
Obr. 1.3	Vývoj velikosti a instalovaného výkonu VTE v čase.....	10
Obr. 1.4	Vyrobená energie za rok v závislosti na výšce stožáru VTE	11
Obr. 1.5	Instalovaný výkon VTE v ČR celkem.....	12
Obr. 1.6	Výsledné pole průměrné rychlosti větru v m/s ve výšce 100 m.....	13
Obr. 1.7	Výsledná mapa území vhodných pro výstavbu VTE	13
Obr. 1.8	Pravděpodobný vývoj výstavby větrných elektráren v ČR	14
Obr. 1.9	Vyrobená el. energie z VTE v ČR	17
Obr. 1.10	Vývoj výkupních cen v ČR	18
Obr. 2.1	Větrná růžice	19
Obr. 2.2	Miskový anemometr.....	20
Obr. 2.3	Mapa pokrytí modelu NAM	27
Obr. 2.4	Oblast pokrytí modelem WRF s rozlišením a) 27 km, b) 9 km	29
Obr. 2.5	Model WRF s rozlišením 3 km	29
Obr. 3.1	Výkonová křivka větrné elektrárny (2 MW).....	30
Obr. 3.2	Rozptyl z výkonu	30
Obr. 3.3	Výkon pohybujícího se větru vztažený na plochu 1 m ²	32
Obr. 3.4	Urychlení větru na kopci	33
Obr. 3.5	Korekce rychlosti vzhledem ke směru větru	34
Obr. 3.6	Průběh skutečné rychlosti větru a predikované rychlosti větru s korekčními parametry vypočtenými pomocí metody nejmenších čtverců	37
Obr. 3.7	Průběh skutečné rychlosti větru a predikované rychlosti větru s korekčními parametry vypočtenými pomocí Powellovy metody sdružených gradientů	37

Obr. 4.1 Kontrola predikce rychlosti větru na 72 hodin	41
Obr. 4.2 Velikost relativní chyby pro predikovanou rychlost větru	41
Obr. 4.3 Výkonová křivka vykreslena pomocí jednotlivých bodů	42
Obr. 4.4 Srovnání výkonu udaného výrobcem a výkonu získaného v rámci experimentálního měření	43
Obr. 4.5 Výkonová křivka větrné elektrárny (2 MW)	43
Obr. 4.6 Kontrola predikce výkonu na 72 hodin	44
Obr. 4.7 Velikost relativní chyby pro predikovaný výkon	45
Obr. 4.8 Závislost chyby na dané četnosti výkonu	45
Obr. 4.9 Přeměněná energie za měřených 72 hodin	46
Obr. 4.10 Velikost relativní chyby pro predikovanou energii	46

Seznam příloh

- Příloha I. Přehled větrných elektráren s výkonem nad 100 kW
- Příloha II. Instalovaný výkon VTE v Evropě k roku 2015
- Příloha III. Hlavní přenosy výkonu vyvolané velkou výrobou VTE v severním Německu a vyznačení úzkých míst zjištěných při kontrole ve studii EWIS (The European Wind Integration Study)